GLASSTONE / LEUTZ

DIE WIRKUNGEN DER KERNWAFFEN

DIE WIRKUNGEN DER KERNWAFFEN

Hinweise:
Die 1. Auflage basiert vermutlich auf der 1950 Ausgabe "The Effects of Atomic Weapons";
Die 2. Auflage erschien 1964 bearbeitet durch **Hermann Leutz** im Carl Heymanns Verlag KG, Köln

Dieses Handbuch, das im Rahmen des »Sonderwaffenprojekts der Streitkräfte« im Ministerium für Verteidigung (Armed Forces Special Weapons Project of the Department of Defense) in Zusammenarbeit mit anderen zuständigen Regierungsstellen ausgearbeitet und von der Atomenergiekommission der Vereinigten Staaten veröffentlicht worden ist, stellt eine umfassende Zusammenstellung des gegenwärtigen Wissens über die Wirkungen von Kernwaffen dar. Die hier enthaltenen Angaben über die Wirkungen sind für Explosionswerte bis zu 20 Megatonnen berechnet. Für eine hypothetische Ausdehnung der Berechnungen über diese Grenze hinaus sind Umrechnungsgesetze angegeben. Die Zahl 20 Megatonnen ist jedoch nicht als Anhaltspunkt für Möglichkeiten oder Entwicklungen gewählt worden.

Charles E. Wilson
Verteidigungsminister

Lewis L. Strauß
Vorsitzender der Atomenergiekommission

VORWORT

Als das Buch »Die Wirkungen von Atomwaffen« im Jahre 1950 erstmalig erschien, entsprach die Sprengkraft der damals bekannten Atomsprengkörper einigen tausend Tonnen Trinitrotoluol (TNT). Den Beschreibungen von Atomexplosionen und ihren Wirkungen war deshalb ein sog. »nomineller« Atomsprengkörper mit einer Energie, die 20000 t (oder 20 Kilotonnen) TNT entsprach, zugrunde gelegt. Es ist jetzt nicht mehr möglich, die Wirkungen mit Werten eines einzigen nominellen Atomsprengkörpers zu beschreiben. Damit ist eine im wesentlichen neue Darstellung der Waffenwirkungen notwendig geworden; sie trägt den Titel »Die Wirkungen der Kernwaffen«.

Der Hauptzweck dieses Buches ist, im Rahmen der von der nationalen Sicherheit gesetzten Grenzen die grundlegenden Erscheinungen und die neuesten Ergebnisse über die Wirkungen zu beschreiben, die mit Explosionen von Kernwaffen verbunden sind. Die Kenntnisse erhielt man durch Beobachtungen, die angestellt wurden nach den in Japan während des Krieges erfolgten Atomsprengkörperabwürfen und bei Erprobungen auf den Versuchsgeländen von Eniwetok und Nevada, sowie durch Versuche mit herkömmlichen Sprengstoffen und durch mathematische Berechnungen. Die Erprobungen haben viele wichtige Ergebnisse über die Waffenwirkungen erbracht; trotzdem muß ein Unterschied gemacht werden zwischen den Folgen bei solchen Versuchen, wenn alle erdenklichen Vorsichtsmaßnahmen getroffen worden sind, um Verluste an Gut und Leben zu vermeiden, und den Folgen der Anwendung von Kernwaffen in Kriegszeiten, wenn der Angreifer darauf hinzielen würde, ein Höchstmaß an Zerstörung und Verlusten zu erreichen. Der Planung von Maßnahmen gegen mögliche Kernwaffenangriffe soll dieses Buch dienen.

Das Buch besteht zum größeren Teil aus einer Darstellung der mit Kernexplosionen verknüpften Tatsachen, sowie aus einer objektiven wissenschaftlichen Analyse dieser Tatsachen. Im letzten Kapitel werden einige allgemeine Schlußfolgerungen gebracht, die den Schutzmaßnahmen zugrunde gelegt werden können. Es muß jedoch betont werden, daß hier nur die Grundsätze des Schutzes behandelt sind; es ist nicht beabsichtigt, bestimmte Verfahren zu empfehlen. Die Verantwortung für die Planung und Durchführung von Maßnahmen, wie Schutzbauten, Schutzräume und Evakuierung, liegt bei der Bundeszivilschutz-Verwaltung und anderen Regierungsstellen der Vereinigten Staaten. Die in diesem Buch enthaltenen Angaben werden sich für diese Stellen bei der Planung solcher Maßnahmen zum Schutze von Gut und Leben der Zivilbevölkerung als nützlich erweisen.

Die mit Kernexplosionen verbundenen Erscheinungen der Druckwellen und Strahlungen sind sehr komplizierter Art. Es ist deshalb unvermeidlich, daß die Be-

schreibung dieser Erscheinungen und ihrer Wirkungen teilweise wissenschaftlich aufgezogen ist. Jedoch ist dieses Buch so abgefaßt, daß es den größtmöglichen Leserkreis anspricht. Zu diesem Zwecke ist jedes Kapitel – außer Kapitel IV, X und XII – in zwei Teile aufgeteilt: der erstere enthält eine Behandlung des betreffenden Stoffes in allgemeinverständlicher Form, während der zweite die mehr wissenschaftliche Behandlung umfaßt. Der Stoff ist so geordnet, daß für den Leser durch Auslassen eines oder aller mehr wissenschaftlichen Abschnitte der Zusammenhang nicht verloren geht. Ich hoffe, daß es dadurch dem normalen Leser möglich ist, alles gut zu verstehen, ohne wissenschaftliche Ausführungen bewältigen zu müssen, mit denen er vielleicht nicht vertraut ist. Der wissenschaftliche Inhalt dagegen ist für die Fachleute bestimmt, wie Architekten und Ingenieure, Mediziner u. a., die vielleicht bei ihrer mit der Schutzplanung zusammenhängenden Arbeit derartige Einzelheiten benötigen.

Samuel Glasstone

INHALT

KAPITEL I

Grundsätzliches über Kernexplosionen

Charakteristische Eigenschaften der Kernexplosionen

Einleitung

1.1 Eine Explosion ist gemeinhin die Freisetzung einer großen Energiemenge in einer sehr kurzen Zeitspanne innerhalb eines begrenzten Raumes. Die Freimachung dieser Energie wird von einem beträchtlichen Temperaturanstieg begleitet, so daß die Produkte der Explosion zu außerordentlich heißen Gasen werden. Diese Gase von sehr hoher Temperatur und sehr hohem Druck bewegen sich rasch nach außen. Hierbei stoßen sie das umgebende Medium – Luft, Wasser oder Erde – mit großer Kraft vor sich her und erzeugen dadurch die zerstörenden (Druckwellen-)Wirkungen der Explosion.

1.1 a[1]) Eine »Druckwelle« beginnt mit der »Druckfront«, einem plötzlichen Druckanstieg, der mit einer vom Explosionszentrum weg gerichteten Stoßwirkung verbunden ist. Hinter der Druckfront bewegt sich das Medium (Luft, Wasser, Erde) vom Zentrum weg, der Überdruck fällt ab. Er sinkt so weit, daß Unterdruck eintritt; etwa gleichzeitig kehrt die Richtung der Bewegung um. Abschließend geht der Druck gegen seinen Normalwert, und die Bewegung läuft aus.

In Luft ist der empfindungsmäßig stärkere Teileffekt die orkanartige Bewegung, während in Wasser oder im Erdboden nur der Stoß empfunden wird[2]).

1.2 Die Atom-(bzw. Kern-)Waffe[3]) ist einem herkömmlichen Sprengkörper (Sprengbombe) insofern ähnlich, als ihre zerstörende Wirkung hauptsächlich auf der Druckwelle beruht. Aber abgesehen von der Tatsache, daß Atomsprengkörper viele tausend Mal wirkungsvoller sein können als die größten TNT-Sprengkörper, sind noch andere, mehr grundsätzliche Unterschiede vorhanden. Erstens wird bei einer Kernexplosion ein ziemlich großer Teil der Energie in Form von Licht und Wärme ausgestrahlt; dies nennt man allgemein »thermische Strahlung«. Sie kann auf bedeutende Entfernungen Hautverbrennungen und Brände verursachen. Zweitens wird die Explosion von unsichtbaren, aber sehr gefährlichen Strahlen von großer Durchdringungsfähigkeit, der sog. »Anfangsstrahlung«, begleitet.

---

[1]) Dieser Abschnitt wurde vom Bearbeiter sinngemäß eingefügt, um einer Verwirrung durch die Unmöglichkeit einer exakten wörtlichen Übersetzung von »blast« vorzubeugen.

[2]) Anmerkung des deutschen Bearbeiters:
Das Englische hat deshalb die beiden Bezeichnungen »blast« (von blasen) und »shock« (= Stoß), denen im Deutschen kein gleichwertiges Bezeichnungspaar gegenüberstellbar ist. Wir unterscheiden deshalb wenn nötig – in der Form »Druckwelle, Wasserstoßwelle und Erdstoßwelle«.

[3]) Wie weiter unten (Abschn. 1.9) ersichtlich, können die Begriffe »Atom« und »Kern« in bezug auf Waffen oder Explosionen wahlweise angewandt werden.

Mit dem Sammelbegriff »Kernstrahlung« werden alle bei Kernprozessen auftretenden Strahlungen zusammenfassend bezeichnet, wobei zu den von der Radioaktivität her bekannten Gamma-, Beta- und Alphastrahlen die Neutronenstrahlen hinzukommen. Schließlich sind die nach einer Kernexplosion verbleibenden Substanzen radioaktiv und senden über einen längeren Zeitraum ähnliche Strahlungen aus. Dies nennt man Rückstandsstrahlung (Bild 1.2).

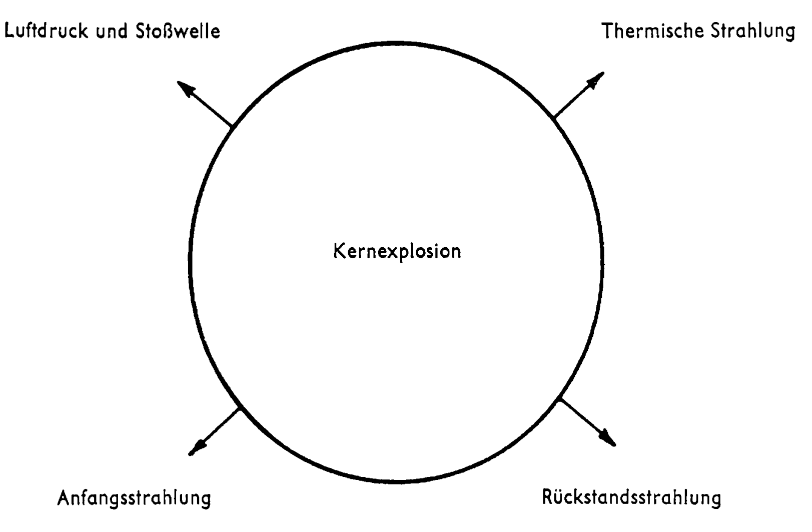


Bild 1.2 Wirkungen einer Kernexplosion

1.3 Auf Grund dieser fundamentalen Unterschiede zwischen einer Kernexplosion und einer herkömmlichen TNT-Detonation sowie auf Grund der weit größeren Wirkungskraft der ersteren erfordern die Wirkungen der Kernwaffen eine besondere Behandlung. In diesem Zusammenhang sind Kenntnis und Verständnis der mit Kernexplosionen verbundenen mechanischen und Strahlungs-Erscheinungen von lebenswichtiger Bedeutung.

1.4 Der Zweck dieses Buches ist, die Tatsachen festzustellen, die die Wirkungen von Kernwaffen betreffen, und eine objektive Analyse dieser Tatsachen durchzuführen. Diese Angaben können hoffentlich den für die Planung von Schutzmaßnahmen Verantwortlichen helfen, Vorkehrungen zu treffen, um den Notständen entgegenzuwirken, die durch Kriegführung mit Kernwaffen heraufbeschworen werden könnten. Außerdem könnten Architekten und Ingenieure diese Angaben nutzbar machen bei dem Entwurf von Bauten mit erhöhter Widerstandsfähigkeit gegen Druckwellen- und Brandschäden und größerer Schutzwirkung gegen Kernstrahlen.

Atomstruktur und Isotope

1.5 Alle Substanzen bestehen aus einer oder mehreren der etwa 90 verschiedenen Arten von Grundstoffen, den sog. »Elementen«. Zu den allgemein bekannten Elementen gehören die Gase Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff, die festen, nichtmetallischen Stoffe Kohlenstoff, Schwefel und Phosphor und zahlreiche Metalle, wie Eisen, Kupfer und Zink. Ein weniger bekanntes Element, das erst in den letzten Jahren wegen seiner Verwendung als atomare (oder Kern-)Energiequelle in den Vordergrund getreten ist, ist das Uran, das für gewöhnlich ein festes Metall ist.

1.6 Der kleinste Teil eines Elementes, der noch die Merkmale dieses Elementes aufweist, wird als »Atom« des betreffenden Elementes bezeichnet. So gibt es Atome von Wasserstoff, Eisen, Uran usw. Das Wasserstoffatom ist das leichteste aller Atome, während die Uranatome die schwersten der in der Natur vorkommenden Atome sind. Schwerere Atome, z. B. die des Plutoniums, das ebenfalls bei der Gewinnung von Atomenergie eine Rolle spielt, sind aus Uran künstlich hergestellt.

1.7 Jedes Atom besteht aus einem verhältnismäßig schweren Zentralbereich oder »Kern«, der von einer Anzahl sehr leichter Teilchen, den sog. »Elektronen«, umgeben ist. Der Atomkern selbst besteht aus einer bestimmten Anzahl von Grundteilchen, die »Protonen« und »Neutronen« heißen. Diese beiden Teilchenarten haben fast die gleiche Masse, unterscheiden sich aber insofern, als das Proton eine Ladungseinheit positiver Elektrizität enthält, während das Neutron, wie sein Name sagt, nicht elektrisch geladen, d. h. neutral ist. Wegen der im Kern vorhandenen Protonen ist er elektrisch positiv geladen, jedoch wird dies im normalen Atom exakt ausgeglichen durch die negative Ladung, welche die Elektronen tragen, die den Kern umgeben.

1.8 Der wesentliche Unterschied zwischen den Atomen der verschiedenen Elemente liegt in der Anzahl der Protonen (oder positiven Ladungen) im Kern; diese Zahl nennt man die »Ordnungszahl« des Elements. Wasserstoffatome z. B. enthalten nur ein Proton, Heliumatome enthalten 2 Protonen, Uranatome enthalten 92 Protonen und Plutoniumatome 94 Protonen. Obwohl alle Kerne eines bestimmten Elementes die gleiche Anzahl von Protonen enthalten, können sie eine verschiedene Anzahl von Neutronen aufweisen. Die dabei herauskommenden Atomarten, welche die gleiche Ordnungszahl haben, aber in ihrer Masse verschieden sind, werden »Isotope« des betreffenden Elementes genannt. Alle Elemente außer etwa 20 kommen in der Natur in zwei oder mehr isotopen Formen vor, und viele andere Isotope, die unstabil, d. h. radioaktiv sind, erhält man auf verschiedene Weise.

Freisetzung von Kernenergie: Verschmelzungs- und Spaltungsreaktionen

1.9 Wie vorstehend gesagt, entsteht eine Explosion durch die sehr rasche Freisetzung einer großen Energiemenge. Bei einer herkömmlichen Detonation rührt diese Energie her von einer Neuanordnung der in dem Sprengstoff vorhandenen Atome, z. B. der Wasserstoff-, Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Stickstoffatome im TNT. Bei

einer Kernexplosion dagegen wird die Energie durch die Neuverteilung oder Neuzusammensetzung der Protonen und Neutronen innerhalb der Atomkerne erzeugt. Das, was gemeinhin als Atomenergie bezeichnet wird, ist also – genau gesagt – Kernenergie, da sie von Reaktionen zwischen Kernen herrührt. Aus diesem Grunde werden auch die Atomwaffen richtiger Kernwaffen genannt. Die Kräfte zwischen den Protonen und Neutronen innerhalb der Atomkerne sind ungeheuer viel größer als die zwischen den Atomen als Ganzes; deshalb ist die Kern-(oder Atom-)Energie von viel höherer Größenordnung als herkömmliche Energie, wenn gleiche Massen der reagierenden Stoffe betrachtet werden.

1.10 Bei Reaktionen zwischen Atomen bzw. Molekülen unterscheidet der Chemiker zwischen Reaktionen, bei denen Energie frei wird, z. B. Verbrennungen, und solchen, die Energie verbrauchen, die nur ablaufen, wenn man Wärme oder elektrische Energie zuführt. Genau ebenso gibt es zwischen Atomkernen energieliefernde und energieverbrauchende Reaktionen. Von Interesse sind hier natürlich nur die ersteren. Ganz allgemein wird Energie frei, wenn die Reaktion von einer lockerer gebundenen Anordnung der Atome bzw. Atomkerne zu einer fester gebundenen führt. Bei den Atomkernen sind nun die von mittlerem Gewicht am festesten gebunden. Deshalb kann man Energie gewinnen, indem man entweder ganz schwere Kerne dazu bringt, sich in je zwei mittelschwere Kerne aufzuteilen (sich zu spalten), oder indem man ganz leichte Kerne dazu bringt, sich zu schwereren Kernen zu vereinigen (zu verschmelzen). Noch einige weitere spezielle Kernreaktionen liefern bei der Einzelreaktion Energie, vermögen aber nicht die Forderung zu erfüllen, die wir folgend stellen müssen.

1.11 Damit eine Kernreaktion uns Energie liefern und sogar schnell liefern kann, muß sie imstande sein, sich selbst als Kettenreaktion durch das reaktionsfähige Material hindurch fortzupflanzen. Diese bei chemischen Reaktionen ganz gewöhnliche Eigenschaft ist bei Kernreaktionen etwas ganz Außergewöhnliches. Nur bei der Spaltungsreaktion bestimmter schwerer Kerne und bei der Verschmelzungsreaktion bestimmter leichter Kerne unter hohen Temperaturen ist diese Eigenschaft gegeben, wenn außerdem noch einige später zu besprechende Nebenbedingungen erfüllt werden.

1.12 Die zur Erzeugung von Kernexplosionen durch Spaltung verwendeten Stoffe sind bestimmte Isotope der Elemente Uran und Plutonium. Wenn ein freies (oder ungebundenes) Neutron in den Kern eines spaltbaren Atoms eindringt, kann es bewirken, daß der Kern in zwei kleinere Teile gespalten wird. Dies ist der Spaltungsprozeß, der von der Freisetzung einer großen Energiemenge begleitet ist. Die kleineren (oder leichteren) Kerne, die dabei entstehen, werden »Spaltungsprodukte« genannt. Die vollständige Spaltung von 1 kg Uran oder Plutonium kann so viel Energie erzeugen wie die Detonation von 20000 t TNT.

1.13 Bei der Kernverschmelzung (auch Fusion genannt) vereinigt sich (oder »verschmilzt«[1])) ein Paar leichter Kerne und bildet einen Kern eines schwereren

[1]) Mit Schmelzen im üblichen Sinne hat das nichts zu tun; es kennzeichnet nur die besonders innige Verbindung.

Atoms. Ein Beispiel stellt die Verschmelzung des Wasserstoffisotops dar, das als Deuterium oder »Schwerer Wasserstoff« bekannt ist. Unter geeigneten Umständen können sich zwei Deuteriumkerne vereinigen und den Kern eines schwereren Elementes, Helium, bilden, wobei viel Energie frei wird.

1.14 Kernverschmelzungsreaktionen können durch sehr hohe Temperaturen zustandegebracht werden; sie werden deshalb auch »thermonukleare[1]) Prozesse« genannt. Die tatsächliche Menge der freigemachten Energie bei einer gegebenen Masse an Material hängt von dem jeweiligen Isotop (oder den Isotopen) ab, die bei Kernverschmelzung beteiligt sind. Zum Beispiel würde die Verschmelzung aller in einem kg des Wasserstoffisotops Deuterium vorhandenen Kerne ungefähr die gleiche Energiemenge liefern wie die Detonation von 50000 t TNT.

1.15 Bei bestimmten Verschmelzungsprozessen zwischen den Kernen von Wasserstoffisotopen werden Neutronen von hoher Energie freigemacht (s. Abschn. 1.55). Diese können in Uran und Plutonium Spaltungen verursachen. Infolgedessen wird das Zusammenbringen der geeigneten Verschmelzungsreaktionen mit spaltbarem Material eine vollständigere Ausnutzung der Spaltungsenergie des letzteren ergeben. Eine Anordnung, in welcher so die Spaltungs- und Verschmelzungs- (thermonuklearen) Reaktionen vereinigt sind, kann deshalb eine Explosion von großer Wirkungskraft hervorbringen.

1.16 Es wird manchmal ein Unterschied gemacht zwischen Kernwaffen, bei denen die Energie durch Spaltung entsteht, und Wasserstoff-(oder thermonuklearen) Waffen, bei denen eine Verschmelzung erfolgt. In beiden Fällen entsteht jedoch die Explosionsenergie durch Kernreaktionen, so daß beide als Kern-(oder Atom-) Waffen bezeichnet werden können. In diesem Buch sind deshalb die allgemeinen Begriffe »Atomsprengkörper« und »Kernwaffen« ohne Rücksicht auf die Art der Kernreaktionen verwendet, die die Explosionsenergie erzeugen.

Energie einer Kernexplosion

1.17 Die Leistung einer Kernwaffe wird durch ihre gesamte Energiefreisetzung, verglichen mit der durch detonierendes TNT freigemachten Energie, festgelegt. Ein 1-kt-Atomsprengkörper erzeugt die gleiche Energiemenge wie die Detonation von 1 kt (oder 1000 t) TNT. In ähnlicher Weise würde ein 1-Megatonnen-Atomsprengkörper den Explosionswert von 1 Million t (oder 1000 kt) TNT haben. Die ersten Atomsprengkörper, wie z. B. die im Jahre 1945 über Japan abgeworfenen, sowie die bei den Versuchen auf Bikini im Jahre 1946 verwendeten, setzten ungefähr die gleiche Menge an Energie frei wie 20000 t (oder 20 kt) TNT. Seit dieser Zeit sind weit wirkungsvollere Waffen mit Explosionswerten im Megatonnenbereich entwickelt worden.

1.18 Aus der Feststellung in Abschn. 1.12, daß die Spaltung von 1 kg Uran oder Plutonium die gleiche Energiemenge ergibt wie 20000 t TNT, geht hervor, daß in

[1]) thermos = Wärme, nucleus = Kern.

einem 20-kt-Atomsprengkörper gerade 1 kg Material gespalten wird. Jedoch ist das tatsächliche Gewicht des Urans oder Plutoniums in einem solchen Atomsprengkörper höher. Mit anderen Worten, bei einem Atomsprengkörper wird nur ein Teil des spaltbaren Materials gespalten. Man sagt deshalb, die Ausbeute liegt unter 100%.

Aufteilung der Energie bei Kernexplosionen

1.19 Bei der Detonation eines herkömmlichen (TNT-)Sprengkörpers tritt fast die gesamte freigesetzte Energie unmittelbar als kinetische (bzw. Wärme-)Energie auf. Wie in Abschn. 1.1 dargelegt, werden fast 100% hiervon in Energie der Druckwelle umgesetzt. Bei einem Atomsprengkörper jedoch ist es anders. Nur etwa 85% der bei der Spaltung freiwerdenden Energie ist Wärme- (bzw. kinetische) Energie, und nur ein Teil hiervon wird zur Erzeugung der Druckwelle nutzbar gemacht. Der übrige Teil dieser 85% tritt als thermische Strahlung, d. h. als Wärme- und Lichtstrahlung in Erscheinung. Das ist eine Folge der bei einer Kernexplosion im Vergleich zu einer herkömmlichen Detonation sehr viel höheren Temperatur. Der als thermische Strahlung ausgesandte Teil der Spaltungsenergie ist je nach Art der Waffe und den Explosionsbedingungen verschieden; bei einem in der freien Luft explodierenden Atomsprengkörper beträgt er etwa $^1/_3$. Demnach dienen etwa 50% der gesamten Energie zur Erzeugung der Druckwelle (Bild 1.19).

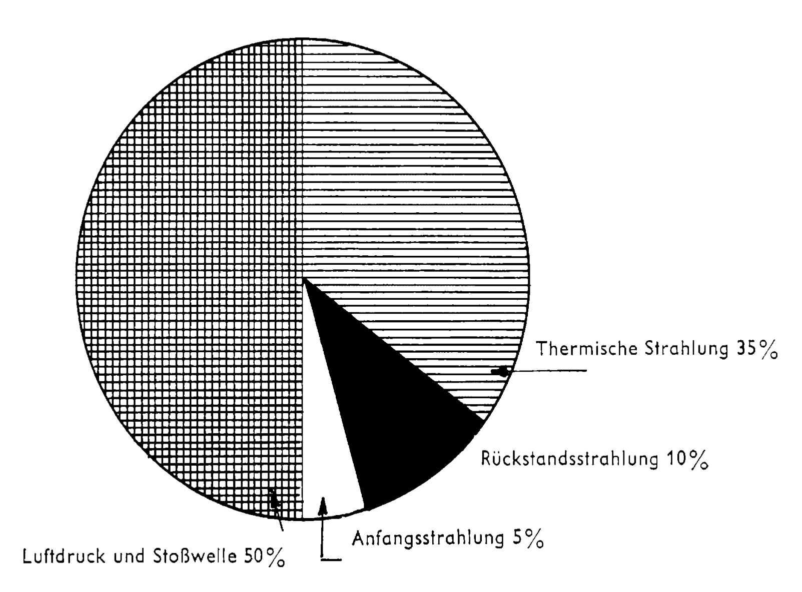


Bild 1.19 Aufteilung der Energie bei einer typischen Luftexplosion

1.20 Die restlichen 15% der Energie der Kernexplosion werden in Form verschiedener Kernstrahlungen frei. 5% davon bilden die Anfangsstrahlung, die innerhalb etwa einer Minute nach der Explosion ausgestrahlt wird; die übrigen 10% der Energie treten im Laufe der Zeit in Form von Rückstandsstrahlung in Erscheinung. Diese beruht fast ausschließlich auf der Radioaktivität der bei der Explosion entstehenden Spaltungsprodukte. Nebenbei sei erwähnt, daß bei einer herkömmlichen Detonation keine Kernstrahlungen auftreten, da die Atomkerne nicht verändert werden.

1.21 Die Anfangsstrahlung besteht hauptsächlich aus Gammastrahlen (ähnlich den Röntgenstrahlen) und Neutronen. Beide – insbesondere die Gammastrahlen – können über große Entfernungen durch die Luft gehen und sogar bedeutende Materialdicken durchdringen. Da diese Strahlungen für Menschen weder sichtbar noch fühlbar sind, aber gefährliche Wirkungen sogar in beträchtlicher Entfernung von ihrer Quelle haben können, sind sie bei Kernexplosionen besonders zu beachten.

1.22 Die Spaltungsprodukte senden während ihres radioaktiven Zerfalls Gammastrahlen und noch eine andere Art Kernstrahlung, die sog. Betateilchen, aus. Letztere sind identisch mit sich schnell bewegenden Elektronen, d. h. leichten, elektrisch negativ geladenen Teilchen (Abschn. 1.7); Betateilchen, die ebenfalls unsichtbar sind, sind viel weniger durchdringend als Gammastrahlen, stellen jedoch ebenso wie die letzteren eine mögliche Gefahr dar.

1.23 Die spontane Aussendung von Betateilchen und Gammastrahlen aus radioaktiven Substanzen, wie Spaltungsprodukten, ist ein allmählicher Prozeß. Er findet während einer geraumen Zeit statt mit einer Stärke, die von der Art des Materials und von seiner vorhandenen Menge abhängt. Wegen des laufenden Zerfalls nehmen die Menge des radioaktiven Materials und die Stärke der Strahlung ständig ab. Das bedeutet, daß die Rückstandsstrahlung, die hauptsächlich auf den Spaltungsprodukten beruht, bald nach der Explosion am stärksten ist, jedoch im Laufe der Zeit nachläßt.

Typen von Kernexplosionen

1.24 Sowohl die unmittelbar mit einer Kernexplosion verbundenen Erscheinungen als auch die Wirkungen der Druckwelle und der thermischen und Kern-Strahlung sind je nach Lage des Explosionspunktes zur Erdoberfläche verschieden. Zur Erläuterung werden vier Typen von Explosionen unterschieden, obwohl in der Praxis viele Abarten und Zwischentypen auftreten können.

Die nachstehend definierten Haupttypen sind

1. Luftexplosion,
2. Unterwasserexplosion,
3. Untererdexplosion,
4. Bodenexplosion.

1.25 Bei einer Kernexplosion bildet sich fast augenblicklich eine sehr heiße und leuchtende Masse von etwa kugelartiger Form, der sog. »Feuerball«. Eine Luft-

explosion ist eine Explosion, bei der der Atomsprengkörper in der Luft, über der Erde oder über Wasser in einer solchen Höhe explodiert, daß der Feuerball (bei maximaler Helligkeit) die Erdoberfläche nicht berührt. Zum Beispiel kann bei Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers der Feuerball anwachsen, bis er bei maximaler Helligkeit einen Durchmesser von fast 1,8 km erreicht hat. Das bedeutet, daß bei Luftexplosion eines solchen Atomsprengkörpers der Punkt, an dem die Explosion erfolgt, mindestens 900 m über der Erdoberfläche liegen muß.

1.26 Die quantitativen Daten einer Luftexplosion hängen von der tatsächlichen Explosionshöhe sowie von ihrem Explosionswert ab, aber die Gesamterscheinungen sind in allen Fällen weitgehend die gleichen. Nahezu die ganze Druckwellenenergie erscheint als Luftstoß, obgleich auch eine Erdstoßwelle entsteht, wenn die Explosion nahe genug am Erdboden stattfindet. Die thermische Strahlung geht über große Entfernungen durch die Luft. Sie ist z. B. bei der Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers stark genug, um an einem einigermaßen klaren Tage auf 20 km Entfernung ziemlich schwere Verbrennungen auf ungeschützter Haut zu verursachen. Die Wärme kann bis über 100 km Entfernung fühlbar sein. Bei Luftexplosionen von noch höheren Explosionswerten sind die entsprechenden Entfernungen natürlich noch größer. Da die thermische Strahlung durch gewöhnliche undurchsichtige Stoffe weitgehend aufgehalten wird, können Bauten und Kleidung einen Schutz bieten.

1.27 Die Anfangsstrahlung einer Luftexplosion durchdringt auch große Strecken in der Luft, obgleich ihre Intensität ziemlich rasch mit zunehmender Entfernung von der Explosion abnimmt. Ebenso wie die Röntgenstrahlen werden die Kernstrahlen nicht leicht absorbiert, und es sind ziemlich dicke Schichten von Materialien, vorzugsweise solche von großer Dichte, notwendig, um die Strahlungsintensität auf ungefährliche Werte zu vermindern. Zum Beispiel würde ein Mensch in einer Entfernung von 1,6 km von der Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers wahrscheinlich eine 30 cm dicke Stahlschicht oder 1,2 m Beton als Schutz benötigen, um vor den Wirkungen der Anfangsstrahlung einigermaßen sicher zu sein.

1.28 Bei einer Luftexplosion in großer oder mittlerer Höhe werden die nach der Kernexplosion zurückbleibenden Spaltungsprodukte weit verstreut. Die Rückstandsstrahlung dieser Produkte ist dann am Erdboden weniger gefährlich. Wenn dagegen die Explosion näher an der Erdoberfläche erfolgt, können die Spaltungsprodukte sich mit verdampfter oder hochgerissener Bodenmaterie vereinigen, die großenteils in der Nähe des Explosionspunktes zur Erde zurückfällt. Dieser Staub und Schutt wird also mit radioaktiver Materie vermischt sein und stellt deshalb für lebende Organismen eine Gefahr dar.

1.29 Erfolgt eine Kernexplosion derart, daß ihr Zentrum unter dem Erdboden oder unter der Wasseroberfläche liegt, so wird dies als »Untererdexplosion« bzw. »Unterwasserexplosion« bezeichnet. Da einige der Wirkungen dieser beiden Explosionsarten einander ähnlich sind, werden sie hier zusammen als Explosionen unter der Oberfläche erörtert.

1.30 Bei einer Explosion unter der Oberfläche tritt der größte Teil der Druckwellenenergie der Explosion als Erd- bzw. Wasserstoßwelle auf; ein bestimmter

Teil jedoch, der um so geringer ist, je tiefer die Explosion erfolgt, entweicht und erzeugt eine Druckwelle in der Luft. Ein großer Teil der thermischen Strahlung und der Anfangsstrahlung wird in geringer Entfernung von der Explosion absorbiert. Die Energie der absorbierten Strahlungen trägt nur zur Erwärmung des Erdbodens oder des Wassers bei. Je nach Explosionstiefe entweicht etwas von der thermischen und der Anfangsstrahlung, aber ihre Intensität ist viel geringer als bei einer Luftexplosion. Jedoch wird die Rückstandsstrahlung jetzt sehr bedeutsam, da große Mengen Erde oder Wasser in der Nähe der Explosion mit radioaktiven Spaltungsprodukten vermischt werden.

1.31 Eine »Bodenexplosion« wird als eine Explosion angesehen, die entweder an der eigentlichen Oberfläche des Bodens oder Wassers oder in einer solchen Höhe über der Oberfläche erfolgt, daß der Feuerball (bei maximaler Helligkeit) den Boden oder das Wasser berührt. Die Energie der Explosion verursacht dann sowohl eine Druckwelle als auch eine Erd- bzw. Wasserstoßwelle in unterschiedlichem Stärkeverhältnis je nach der Höhe des Explosionspunktes über der Oberfläche. Hiervon hängen auch die Mengen der thermischen Strahlung und der Anfangsstrahlung ab, die aus dem Feuerball entweichen. Die Rückstandsstrahlung wird eine bedeutende Gefahr darstellen wegen der auch in diesem Fall entstehenden großen Mengen verstrahlten Staubes oder Wassers.

1.32 Obwohl die vier Explosionstypen so betrachtet worden sind, als wären sie einigermaßen deutlich ausgeprägt, gibt es eigentlich doch keine klare Grenzlinie zwischen ihnen. Es ist einleuchtend, daß mit abnehmender Explosionshöhe eine Luftexplosion zu einer Bodenexplosion wird. In ähnlicher Weise geht eine Explosion in geringer Tiefe unter der Oberfläche in eine Bodenexplosion über, wenn ein Teil des Feuerballes die Erdboden- oder Wasseroberfläche durchbricht. Es ist trotzdem eine Frage der Zweckmäßigkeit – wie wir in den späteren Kapiteln sehen werden –, die Kernexplosionen in die vorstehend aufgeführten vier Typen einzuteilen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Kernexplosionen[1])

Die Spaltungskettenreaktion

1.33 Ein bedeutsamer Punkt bei der Spaltung eines Uran- oder Plutoniumkernes mittels eines Neutrons liegt neben dem Freiwerden einer großen Energie darin, daß der Prozeß von der fast augenblicklichen Ausstoßung zweier oder mehrerer Neutronen begleitet ist. Die auf diese Art freigemachten Neutronen sind imstande, die Spaltung weiterer Uran- oder Plutoniumkerne zu verursachen, und ein jeder dieser Prozesse ergibt wieder die Ausstoßung von Neutronen, die weitere Spaltungen erzeugen können und so fort. So könnte im Prinzip ein einziges Neutron eine Kette von

[1]) Die übrigen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

Kernspaltungen bewirken, bei der die Zahl der beteiligten Kerne und die freigemachte Energie in ungeheurem Maße zunehmen.

1.34 Tatsächlich aber verursachen nicht alle in dem Spaltungsprozeß freigemachten Neutronen weitere Spaltungen; einige dieser Neutronen entweichen, andere gehen bei Nichtspaltungsreaktionen verloren. Der Einfachheit halber sei jedoch einmal angenommen, daß bei jedem gespaltenen Uran- oder Plutoniumkern zwei Neutronen erzeugt werden, die imstande sind, weitere Spaltungen zu verursachen. Nehmen wir weiterhin an, daß als Anfang ein einziges Neutron durch einen Kern in einer bestimmten Menge Uran eingefangen wird, so daß eine Spaltung eintritt. Dann werden zwei Neutronen freigemacht, und diese bewirken, daß zwei weitere Kerne gespalten werden. Das ergibt die Erzeugung von vier für die Spaltung zur Verfügung stehenden Neutronen und so fort.

1.35 Entsprechend wird die Zahl der Neutronen und demnach auch die Zahl der gespaltenen Kerne bei jeder Generation verdoppelt. Beginnen wir mit einem einzigen Neutron, so steigert sich die Anzahl rasch, nämlich 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64... Nach weniger als 90 Generationen würden genügend Neutronen erzeugt worden sein, um die Spaltung sämtlicher Kerne in 50 kg Uran zu bewirken; dies würde die Freisetzung der gleichen Energiemenge ergeben wie bei Detonation einer Million Tonnen (1 Megatonne) TNT.

1.36 Die für den eigentlichen Spaltungsprozeß erforderliche Zeit ist sehr kurz, und die meisten der entstehenden Neutronen werden sofort ausgestoßen. Infolgedessen wird das Zeitintervall zwischen den aufeinanderfolgenden Generationen durch die durchschnittliche Zeit bestimmt, die zwischen dem Freiwerden des Neutrons und seinem Eingefangenwerden durch einen spaltbaren Kern vergeht. Diese Zeit hängt u. a. von der Energie (oder Geschwindigkeit) des Neutrons ab. Wenn die meisten der Neutronen von ziemlich hoher Energie sind – sie werden dann allgemein als »schnelle Neutronen« bezeichnet –, beträgt das Zeitintervall etwa den einhundertmillionsten Teil einer Sekunde. In diesem Fall würde die 90. Generation in weniger als einer millionstel Sekunde erreicht sein. Die Freisetzung der Energie, die einem Gegenwert von 1 Megatonne TNT entspricht, in so kurzer Zeit würde die Voraussetzungen für eine ungeheure Explosion schaffen.

1.37 Wir sehen also, daß der Spaltungsprozeß von der augenblicklichen Freimachung von Neutronen und daneben von der Freisetzung von Energie begleitet ist. Deshalb ist es grundsätzlich möglich, eine sich selbst aufrechterhaltende Kettenreaktion ablaufen zu lassen. Die Folge ist, daß wenige Kilo spaltbaren Materials innerhalb eines sehr geringen Bruchteils einer Sekunde dazu gebracht werden können, so viel Energie freizugeben, wie bei der Detonation von Tausenden (oder Millionen) Tonnen TNT frei werden. Hierin liegt das Grundpinzip eines durch Kernspaltung explodierenden Atomsprengkörpers.

Kritische Größe eines durch Kernspaltung explodierenden Atomsprengkörpers

1.38 Es ist oben gesagt worden, daß einige der bei der Spaltung erzeugten Neutronen durch Entweichen oder durch Eingefangenwerden bei Nichtspaltungsprozessen verlorengehen. Liegen die Verhältnisse so, daß die Neutronen in größerer Zahl verlorengehen, als sie durch Spaltung gebildet werden, dann kann sich die Kettenreaktion nicht aufrechterhalten. Es würde ein wenig Energie erzeugt werden, aber ihre Menge würde nicht ausreichen, und sie würde nicht schnell genug frei werden, um eine wirksame Explosion zu verursachen. Es ist deshalb notwendig, um eine Kernexplosion zu erreichen, daß Verhältnisse geschaffen werden, bei denen der Verlust von Neutronen auf ein Mindestmaß beschränkt wird. Deshalb ist es von Bedeutung, insbesondere die Neutronen zu betrachten, die aus dem in Spaltung begriffenen Material entweichen.

1.39 Das Entweichen von Neutronen erfolgt an der (äußeren) Oberfläche der Uran- oder Plutoniummasse. Der Verlust durch Entweichen ist also proportional der Oberfläche. Der Spaltungsprozeß dagegen, der die Neubildung von Neutronen ergibt, findet in der gesamten Materialmasse statt, und seine Geschwindigkeit hängt also von dem Volumen ab. Der relative Verlust an Neutronen durch Entweichen kann demnach durch Steigerung der Größe des spaltbaren Materials verringert werden, denn dann wird das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen kleiner.

1.40 Dieser Vorgang wird in Bild 1.40 anschaulich gemacht durch zwei kugelförmige Massen spaltbaren Materials, deren eine größer ist als die andere. Die Spaltung

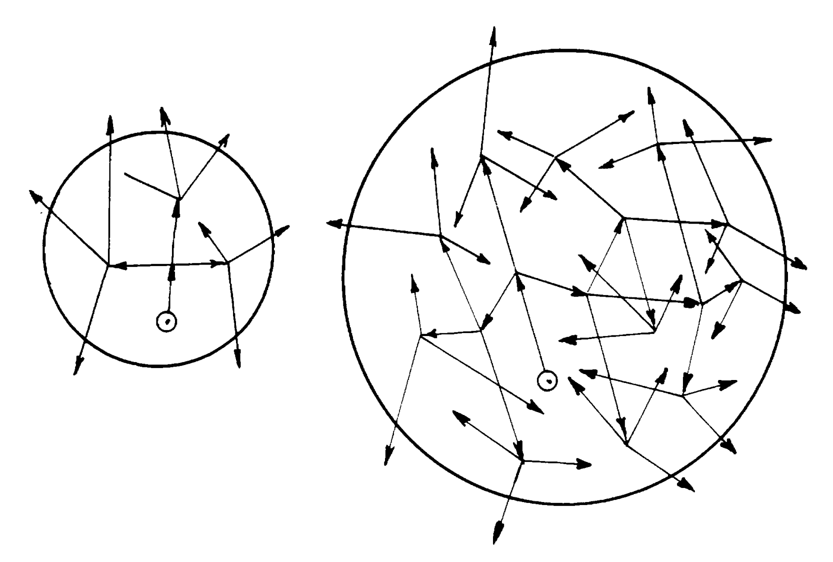


Bild 1.40 *Verringerung des durch Entweichen verlorengehenden Neutronenanteils durch Vergrößerung der Menge spaltbaren Materials*

wird durch ein Neutron angefangen, das durch einen Punkt in einem kleinen Kreis dargestellt ist. Es sei diesmal ein spaltbares Material angenommen, bei dem bei jedem Spaltungsakt drei Neutronen ausgestoßen werden; mit anderen Worten: ein Neutron wird eingefangen, und je drei werden ausgesandt. Das Verschwinden eines Neutrons aus dem System wird durch den Kopf eines Pfeiles dargestellt. So bedeutet ein Pfeilkopf innerhalb der Kugel, daß eine Spaltung eintritt und neue Neutronen erzeugt werden, während ein Pfeilkopf außerhalb der Kugel den Verlust eines Neutrons bedeutet. Aus Bild 1.40 ist ersichtlich, daß ein viel größerer Bruchteil der Neutronen aus der kleineren Kugel verlorengeht als aus der größeren Kugel.

1.41 Ist die Uran- oder Plutoniummenge klein, d. h., ist das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen groß, dann ist der Teil der durch Entweichen verlorengehenden Neutronen so groß, daß die Fortsetzung einer Kernspaltungskette und damit die Erzeugung einer Explosion nicht möglich ist. Wird aber das Uran- oder Plutoniumstück vergrößert, wodurch sich der relative Neutronenverlust verringert, dann wird ein Punkt erreicht, an dem die Kettenreaktion selbständig weiterlaufen kann. Diese Menge nennt man die »kritische Masse« des spaltbaren Materials.

1.42 Damit also eine Kernexplosion stattfinden kann, muß die Waffe eine genügende Menge Uran oder Plutonium enthalten, die die kritische Masse unter den vorliegenden Bedingungen übersteigt. Die kritische Masse hängt u. a. ab von der Form des Materials, der Zusammensetzung und dem Vorhandensein von Verunreinigungen, die Neutronen in Nichtspaltungsreaktionen wegfangen können. Durch Umgeben des spaltbaren Materials mit einem geeigneten Neutronen-»Reflektor« kann der Verlust von Neutronen durch Entweichen vermindert und damit auch die kritische Masse verringert werden.

Das Erzielen der kritischen Masse

1.43 Eine Menge eines geeigneten Isotops von Uran oder Plutonium, die die kritische Masse übersteigt, ist auf Grund des Vorhandenseins einzelner Neutronen in der Atmosphäre oder der Möglichkeit, daß vereinzelte Neutronen auf verschiedene Weisen überall entstehen können, stets geneigt, zu explodieren oder wenigstens zu schmelzen. Deshalb ist es notwendig, daß ein Atomsprengkörper vor seiner Explosion kein Stück spaltbaren Materials enthält, das so groß ist wie die kritische Masse unter den gegebenen Bedingungen. Um eine Explosion zu verursachen, muß das Material dann überkritisch gemacht werden, d. h. größer als die kritische Masse, und zwar in einer so kurzen Zeit, daß eine rückgängige Veränderung, z. B. durch Schmelzen, zu einer wieder unterkritischen Anordnung nicht möglich ist.

1.44 Zwei grundsätzliche Methoden sind beschrieben worden, wie eine Kernexplosion erzeugt werden kann, d. h. wie ein unterkritisches System schnell in ein überkritisches verwandelt werden kann. Bei der ersten Methode werden zwei oder mehrere Stücke spaltbaren Materials, von denen jedes kleiner ist als die kritische Masse, sehr rasch zusammengebracht, so daß sie ein einziges Stück bilden, das die

kritische Masse übersteigt. Dies kann durch eine Art Geschützrohr-Vorrichtung erreicht werden, wobei ein Sprengstoff dazu verwendet wird, ein unterkritisches Stück spaltbaren Materials von dem Verschlußende des Geschützes auf ein anderes unterkritisches Stück zu schießen, das am Mündungsende fest eingebaut ist.

1.45 Die zweite Methode macht Gebrauch von der Tatsache, daß eine unterkritische Menge eines geeigneten Uran- oder Plutoniumisotops durch starkes Komprimieren (Größenordnung Million atm) kritisch oder überkritisch werden kann. Das kommt daher, daß bei Verringerung der Ausdehnung und damit auch der Oberfläche (bzw. der Neutronenaustrittsfläche) einer gegebenen Menge spaltbaren Materials der Neutronenverlust durch Entweichen im Verhältnis zur Erzeugung durch Spaltung verringert wird. Eine selbständige Kettenreaktion kann dann bei der gleichen Masse möglich werden, die, als sie nicht unter Druck stand, unterkritisch war.

1.46 Bei einem Atomsprengkörper, der durch Kernspaltung explodiert, kann der Druck durch eine kugelförmige Anordnung besonders geformter Stücke von normalen Sprengstoffen erreicht werden. In einem Hohlraum in der Mitte dieses Systems befindet sich eine unterkritische Kugel von spaltbarem Material. Wenn der Sprengstoff mittels einer Anzahl von Zündern an der Außenseite gezündet wird, entsteht eine einwärts laufende »Implosions«-Welle. Wenn diese Welle die Uran- oder Plutoniumkugel erreicht, bewirkt sie, daß die letztere so stark zusammengedrückt wird, daß sie überkritisch wird und explodiert.

Spaltungsprodukte

1.47 Wenn Uran- oder Plutoniumkerne Neutronen einfangen und gespalten werden, dann bilden sich viele verschiedene Spaltungsbruchstücke, d. h. direkt durch die Spaltung entstehende Kerne. Der Grund dafür ist, daß es etwa 40 verschiedene Möglichkeiten gibt, wie die Kerne sich bei der Spaltung mehr oder weniger unsymmetrisch in zwei Teile teilen können. Die meisten – wenn nicht gar alle – der etwa 80 Kernarten, die auf diese Weise erzeugt werden, sind radioaktive Formen (Radioisotope) bekannter leichterer Elemente. Die Radioaktivität besteht gewöhnlich in der Aussendung negativ geladener Betateilchen (s. Abschn. 1.22). Diese wird in den meisten Fällen von Gammastrahlung begleitet, mit deren Aussendung überschüssige (Anregungs-)Energie der Kerne abgegeben wird. Nur in wenigen Ausnahmefällen tritt lediglich Gammastrahlung auf.

1.48 Durch die Ausstoßung eines Betateilchens wird der Kern einer radioaktiven Substanz in den Kern eines anderen Elementes umgewandelt, das »Zerfallsprodukt« genannt wird. Bei den Spaltkernen sind die Zerfallsprodukte im allgemeinen ebenfalls radioaktiv; sie können weiter unter Aussendung von Betateilchen und Gammastrahlen zerfallen. Es gibt im Durchschnitt etwa drei radioaktive Stufen für jeden Spaltkern, bevor ein stabiler (nichtradioaktiver) Kern entsteht. Weil die Spaltung auf eine große Zahl verschiedener Arten erfolgt und weil jeder Spaltkern wiederum

in mehrere Stufen zerfällt, wird die Spaltungsproduktmischung sehr kompliziert[1]). Unter den Spaltungsprodukten sind ungefähr 200 oder noch mehr verschiedene Isotope von 35 Elementen festgestellt worden, vom Zink bis zum Gadolinium.

1.49 Die Schnelligkeit der radioaktiven Umwandlung, d. h. die Stärke der Aussendung von Betateilchen und Gammastrahlen, wird für gewöhnlich durch die »Halbwertszeit« des betreffenden Isotops festgelegt. Dies ist die Zeit, die die Radioaktivität einer gegebenen Menge eines bestimmten Radioisotops braucht, um auf die Hälfte ihres ursprünglichen Wertes abzusinken, oder mit anderen Worten, in der die Hälfte der Menge des Radioisotops zerfällt. Jede einzelne radioaktive Atomart hat eine bestimmte Halbwertszeit, die unabhängig ist von ihrem Zustand oder ihrer Menge. Unter den Spaltungsprodukten fand man Halbwertszeiten zwischen einem Bruchteil einer Sekunde und etwa einer Million Jahren.

1.50 Die nach einer Kernexplosion entstehende Mischung ist so kompliziert, daß, obwohl jedes in den Spaltungsprodukten vorhandene Radioisotop eine bestimmte Halbwertszeit hat, es nicht möglich ist, den Zerfall als Ganzes durch eine Halbwertszeit zu beschreiben. Aber es ist bei Versuchsmessungen, die über einen längeren Zeitraum ausgedehnt wurden, festgestellt worden, daß die Verringerung der gesamten Strahlungsintensität der Spaltungsprodukte mit einer ziemlich einfachen Formel berechnet werden kann. Diese ist in Kapitel IX angegeben und besprochen. Den aus dieser Formel folgenden allgemeinen Verlauf des Zerfalls der Spaltungsprodukte zeigt Bild 1.50. Die Rückstandsstrahlung aus den Spaltungsprodukten 1 Stunde nach einer Kernexplosion ist darin gleich 100 gesetzt. Die darauffolgende Abnahme mit fortschreitender Zeit ist durch die Kurve angegeben. Wir sehen, daß 7 Stunden nach der Explosion die Radioaktivität der Spaltungsprodukte auf etwa $^1/_{10}$ (10%) des Wertes abgesunken ist, den sie eine Stunde nach der Explosion hatte. Innerhalb von etwa 2 Tagen vermindert sich die Radioaktivität auf 1% des eine Stunde nach der Explosion gemessenen Wertes.

1.51 Außer der Betateilchen- und der Gammastrahlenaktivität aus den Spaltungsprodukten gibt es noch eine andere Art von Rückstandsstrahlung, die erwähnt werden sollte. Dies ist die Radioaktivität des spaltbaren Materials, von dem ein Teil – wie in Abschn. 1.18 gesagt – nach der Explosion übrig bleibt. Sowohl Uran als auch Plutonium sind radioaktiv, und ihre Aktivität besteht in der Aussendung der sog. »Alphateilchen«. Diese sind eine Form der Kernstrahlung, da sie aus Atomkernen ausgestoßen werden; sie unterscheiden sich jedoch von den in den Spaltungsprodukten erzeugten Betateilchen dadurch, daß sie viel schwerer und elektrisch positiv geladen sind. Alphateilchen sind identisch mit den Kernen von Heliumatomen.

1.52 Wegen ihrer größeren Masse und Ladung sind Alphateilchen viel weniger durchdringend als Betateilchen und Gammastrahlen gleicher Energie. Nur sehr wenige Alphateilchen aus radioaktiven Substanzen können mehr als 6 cm Luft durchdringen, bevor sie abgebremst werden. Es ist fraglich, ob diese Teilchen durch

[1]) Die allgemeine Bezeichnung »Spaltungsprodukte« wird benutzt, um die komplizierte Mischung zu kennzeichnen, die sich innerhalb einer kurzen Zeit nach der Spaltung bildet.

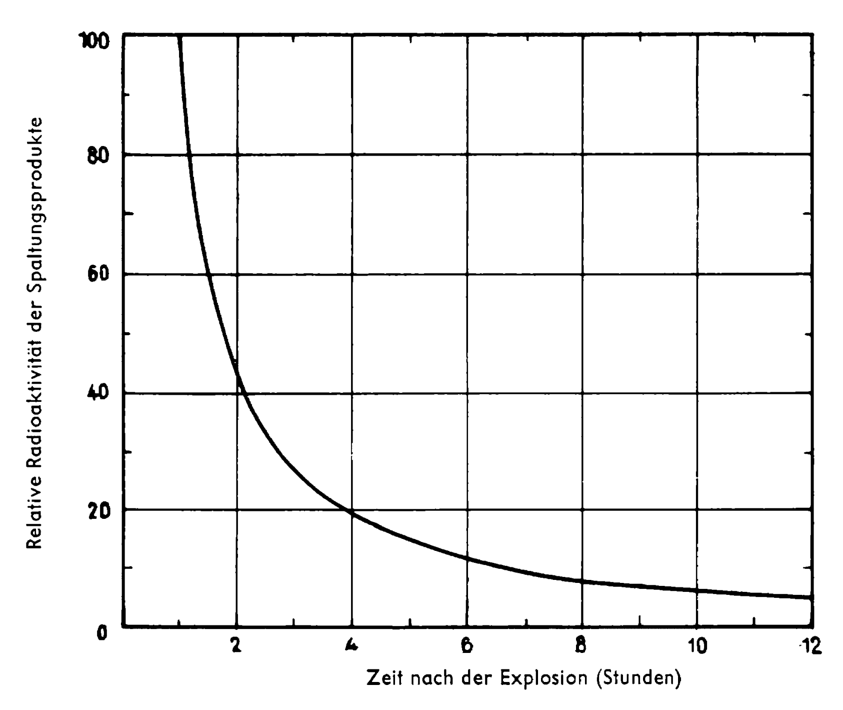


Bild 1.50 Zerfall der Spaltungsprodukte nach einer Kernexplosion. (Die Radioaktivität 1 Stunde nach der Explosion ist gleich 100 gesetzt.)

unverletzte Haut hindurchkommen; auf jeden Fall können sie Kleidung nicht durchdringen. Infolgedessen stellt das in den Sprengkörperüberresten vorhandene Uran oder Plutonium am Äußeren des menschlichen Körpers keine Gefahr dar. Wenn jedoch insbesondere Plutonium bei der Nahrungsmittelaufnahme, beim Atmen oder durch Hautabschürfungen in den Körper gelangt, ist die Wirkung gefährlich.

Thermonukleare Verschmelzungsreaktionen

1.53 Die Energieerzeugung in der Sonne und den Sternen erfolgt zweifellos durch Verschmelzungsreaktionen (auch Fusionsreaktionen genannt), bei deren Ablauf die Kerne verschiedener leichter Atome (von geringem Atomgewicht) beteiligt sind. Aus Laboratoriumsversuchen mit Zyklotrons und ähnlichen Versuchseinrichtungen ging hervor, daß die Verschmelzung von Wasserstoffisotopen auf der Erde erreichbar sein müßte. Dieses Element kommt, wie bekannt, in drei isotopen Formen vor, bei denen die Kerne eine Masse von 1, 2 oder 3 haben. Diese werden im allgemeinen als Wasserstoff (H^1), Deuterium (H^2 oder D^2) und Tritium (H^3 oder T^3) bezeichnet. Alle Kerne

enthalten eine einzige positive Ladung, d. h. sie enthalten alle 1 Proton, aber sie unterscheiden sich in der Zahl der Neutronen. Die leichtesten Kerne (H^1 oder Protonen) enthalten keine Neutronen; die Deuteriumkerne (D^2) enthalten je ein Neutron, und Tritiumkerne (T^3) enthalten je 2 Neutronen.

1.54 Eine Anzahl verschiedener Verschmelzungsreaktionen sind zwischen den Kernen der drei Wasserstoffisotope möglich, bei denen entweder zwei gleiche oder zwei verschiedene Kerne verschmelzen. Damit diese Reaktionen in beträchtlichem Ausmaße erfolgen, müssen die Kerne hohe Energien haben. Diese Energien kann man ihnen durch einen Teilchenbeschleuniger, z. B. ein Zyklotron, geben. In diesem Falle verbraucht aber der Beschleuniger stets viel mehr Energie, als die damit erzielbaren Kernreaktionen liefern können. Man gewinnt also keine Energie. Eine andere Möglichkeit liegt darin, die Temperatur auf sehr hohe Grade zu steigern. In diesem Falle werden die Verschmelzungsprozesse als »thermonukleare Reaktionen« bezeichnet, wie bereits oben erwähnt, und in diesem Falle ist im Gegensatz zum vorhergehenden Energie zu gewinnen.

1.55 Vier thermonukleare Verschmelzungsreaktionen sind für die Energieerzeugung wesentlich, da sie bei erreichbaren Temperaturen schnell genug verlaufen. Es sind folgende:

$$D^2 + D^2 = He^3 + n + 3{,}2\ \text{MeV}$$

$$D^2 + D^2 = T^3 + H^1 + 4\ \text{MeV}$$

$$T^3 + D^2 = He^4 + n + 17\ \text{MeV}$$

$$T^3 + T^3 = He^4 + 2n + 11\ \text{MeV};$$

hierbei ist He das Zeichen für Helium, und n stellt ein Neutron dar (Masse = 1). Die in den einzelnen Fällen freiwerdende Energie ist in MeV (Millionen Elektronenvolt) angegeben[1]). Die Spaltung eines Uran- oder Plutoniumkernes ergibt alles in allem eine Energie von etwa 200 MeV, wobei der gespaltene Kern ein Atomgewicht von fast 240 hat. Dasselbe Gewicht haben 120 Deuteriumkerne, die bei Verschmelzung eine Energie von fast 600 MeV liefern. Also würde – aufs Gewicht bezogen – die Verschmelzung von Deuteriumkernen fast 3mal so viel Energie ergeben wie die Spaltung von Uran oder Plutonium.

1.56 Um die Kernverschmelzungsreaktionen in Gang zu bringen, sind Temperaturen in der Größenordnung einer Million Grad notwendig. Die einzige bekannte Art, solche Temperaturen zu erzeugen, ist die Spaltungsexplosion. Demnach müßte es möglich sein, durch Kombination einer Portion Deuterium oder Tritium (oder einer Mischung hiervon) mit einem durch Kernspaltung wirksam werdenden Atomsprengkörper eine oder mehrere der oben angeführten thermonuklearen Verschmelzungsreaktionen anlaufen zu lassen. Wenn diese Reaktionen, verbunden mit ihrer Energie-

[1]) Ein Elektronen-Volt (eV) ist die Energie, die an einem Elektron frei wird, wenn es eine Spannungsdifferenz von 1 Volt durchläuft. Die bei chemischen Umsetzungen freiwerdenden Energien betragen pro Molekül etwa ein bis einige eV. Für die bei Kernreaktionen freiwerdenden Energien ist die millionenfache Einheit MeV angemessen. In mechanischen Einheiten ist 1 MeV = $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ erg = $1{,}6 \cdot 10^{-13}$ Joule.

entwicklung, sich rasch durch das Volumen des Wasserstoffisotops (oder der Isotope) fortpflanzen würden, dann kann eine thermonukleare Explosion verwirklicht werden.

1.57 Es sei erwähnt, daß die beiden Reaktionen, bei denen Tritium (T^3) beteiligt ist, aus mehreren Gründen besonders interessant sind. Nicht nur, daß sie rascher verlaufen als diejenigen, bei denen nur Deuterium mitwirkt, und mehr Energie erzeugen, sondern es werden außerdem jedesmal ein oder zwei Neutronen frei. Diese Neutronen sind imstande, zur Spaltung von Uran und Plutonium beizutragen (s. Abschn. 1.15); damit erhöhen sie die Gesamtenergieausbeute des kombinierten Spaltungs-Verschmelzungssystems.

KAPITEL II

Beschreibung von Kernexplosionen

Einleitung

2.1 Eine Kernexplosion ist mit einer Anzahl charakteristischer Erscheinungen verbunden; einige sind sichtbar, andere nicht direkt sichtbar. Gewisse Punkte dieser Erscheinungen hängen von dem Explosionstyp ab, z. B. Luftexplosion, Bodenexplosion oder Untererd- bzw. Unterwasserexplosion, wie in Kap. I angeführt. Außerdem können meteorologische Verhältnisse, wie Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Niederschläge und atmosphärischer Druck einige der wahrnehmbaren Wirkungen beeinflussen, obwohl die Gesamtmerkmale, die weiter unten beschrieben werden sollen, unverändert bleiben.

2.2 Die in diesem Kapitel enthaltenen Beschreibungen beziehen sich hauptsächlich auf die Erscheinungen, die mit der Explosion eines Atomsprengkörpers mit einem Explosionswert von 1 Megatonne TNT in der Luft (oder nahe der Erdoberfläche) verbunden sind. Für eine Unterwasserexplosion in geringer Tiefe liegen nur Angaben aus Bikini vom Jahre 1946 vor, als ein 20-kt-Sprengkörper etwa 60 m unter Wasser explodierte. Außerdem sind die zu erwartenden Ergebnisse bei Explosionen von anderen Explosionswerten angeführt. In der Regel jedoch sind die grundlegenden Erscheinungen bei einer Explosion gegebenen Typs von dem Explosionswert nicht sehr abhängig.

2.3 In den folgenden Betrachtungen wird zunächst angenommen, daß die Explosion in der Luft in beträchtlicher Höhe über der Erdoberfläche erfolgt. Die sich aus einer Bodenexplosion ergebenden Abweichungen sind ebenfalls angeführt. Anschließend sind einige der mit einer Unterwasser- bzw. Untererdexplosion verbundenen besonderen Erscheinungen beschrieben.

Beschreibung von Luft- und Bodenexplosionen

Der Feuerball

2.4 Wie wir bereits gesehen haben, führt die Spaltung von Uran oder Plutonium in einer Kernwaffe zur Freisetzung einer großen Energiemenge innerhalb eines sehr kurzen Zeitraums bei einer begrenzten Masse von Materie. Dadurch werden die Spaltungsprodukte, das Sprengkörpergehäuse, sonstige Teile der Waffe sowie die umgebende Luft auf außerordentlich hohe Temperaturen gebracht, die denen im

Mittelpunkt der Sonne nahekommen. Die höchste in einem durch Kernspaltung explodierenden Atomsprengkörper erreichte Temperatur beträgt wahrscheinlich mehrere Millionen Grad. Demgegenüber beträgt die bei einem herkömmlichen Sprengkörper (TNT) erreichte Höchsttemperatur 5000° C. Durch die von der Kernexplosion erzeugte große Wärme werden alle Stoffe gasförmig. Da die Gase zum Zeitpunkt der Explosion auf den von den ursprünglichen Bestandteilen des Sprengkörpers eingenommenen Raum beschränkt sind, werden ungeheure Drücke erzeugt. Diese sind wahrscheinlich mehrere hunderttausendmal so hoch wie der atmosphärische Druck, d. h. sie liegen in der Größenordnung von Hunderttausenden kg/cm².

2.5 Innerhalb weniger millionstel Sekunden nach der Explosion des Atomsprengkörpers erscheinen die auf diese Weise gebildeten, sehr heißen Gase von außerordentlich hohem Druck als eine etwa kugelförmige, stark leuchtende Masse. Dieses ist der Feuerball (s. Abschn. 1.25); in Bild 2.5 ist ein typischer Feuerball dargestellt, der eine Luftexplosion begleitet. Obwohl die Helligkeit mit der Zeit nachläßt – etwa nach 0,7 Millisekunden –, erscheint der Feuerball aus einem 1-Megatonnen-Atomsprengkörper dem etwa 100 km entfernten Beschauer als über 30mal so leuchtend wie die Mittagssonne. Bei mehreren der auf dem Versuchsgelände von Nevada durchgeführten Kernversuche, bei denen die Explosionswerte der Atomsprengkörper jedesmal unter 100 kt lagen, war das blendende Licht am Himmel in den frühen Morgenstunden mehr als 650 km weit sichtbar.

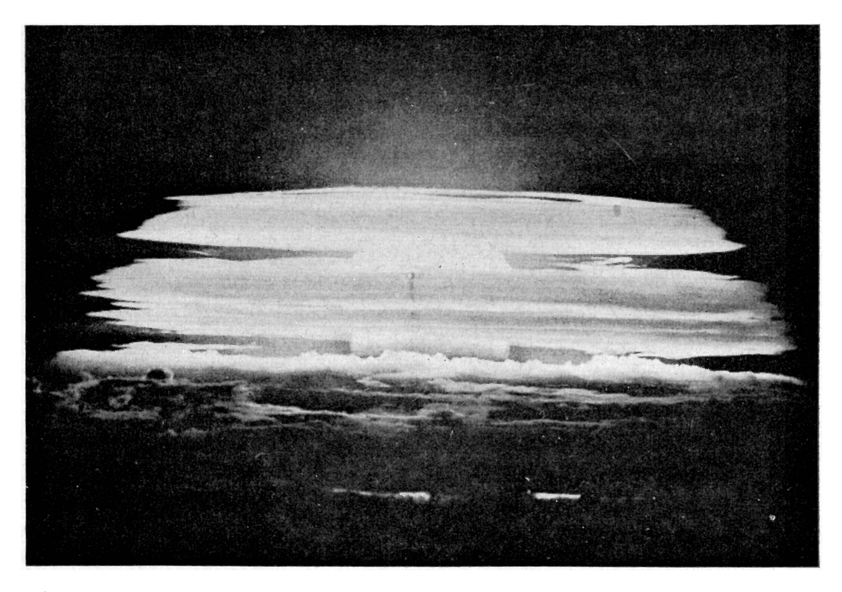


Bild 2.5 Feuerball aus einer Luftexplosion im Megatonnenbereich, aufgenommen aus etwa 3700 m Höhe und etwa 80 km Entfernung. Der Feuerball ist teilweise von der Kondensationswolke umgeben (s. Abschn. 2.43).

2.6 In der Regel verändert sich die Leuchtkraft im Verhältnis zum Explosionswert nicht wesentlich. Somit sind die erreichten Oberflächentemperaturen, von denen die Helligkeit abhängt, trotz der Unterschiede in der Gesamtmenge der freigesetzten Energie nicht sehr verschieden.

2.7 Der Feuerball beginnt, unmittelbar nachdem er sich gebildet hat, an Größe zuzunehmen, wobei er die umgebende Luft mitfaßt. Dieses Anwachsen ist mit einem Temperatur- und Druckabfall und damit auch mit einem Nachlassen der Leuchtkraft verbunden. Gleichzeitig steigt der Feuerball wie ein Heißluftballon in die Höhe. Innerhalb von 0,7 Millisekunden nach der Explosion erreicht der Feuerball eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers einen Radius von etwa 65 m, der innerhalb von 10 Sekunden auf einen Maximalwert von etwa 1100 m anwächst. Der Feuerball hat dann einen Durchmesser von rund 2200 m und steigt mit einer Geschwindigkeit von 75–110 m/sec hoch. Nach einer Minute hat er sich so weit abgekühlt, daß er nicht mehr sichtbar ist. Er ist dann rund 7 km vom Explosionspunkt hochgestiegen.

Die atomare (radioaktive) Wolke

2.8 Während der Feuerball noch leuchtet, ist die Temperatur – zumindest in seinem Innern – so hoch, daß das gesamte Sprengkörpermaterial verdampft ist. Das gilt auch für die radioaktiven Spaltungsprodukte, für das der Spaltung entgangene Uran oder Plutonium sowie für das Gehäuse- (und sonstige) Material des Atomsprengkörpers. Wenn der Feuerball an Größe zunimmt und sich abkühlt, kondensieren die Dämpfe zu einer Wolke, die feste Teilchen der Sprengkörpertrümmer sowie viele kleine Tropfen Wasser aus der in den hochsteigenden Feuerball eingesogenen Luft enthält.

2.9 Die Farbe der so gebildeten Atomwolke ist anfangs rot oder rötlich-braun auf Grund des Vorhandenseins verschiedener farbiger Zusammensetzungen (salpetrige Säure und Stickoxyde) an der Oberfläche des Feuerballes. Diese rühren aus der chemischen Reaktion des Stickstoffs, Sauerstoffs und Wasserdampfes in der Luft auf Grund der vorhandenen hohen Temperaturen her. Wenn der Feuerball sich abkühlt und eine Kondensation eintritt, wird die Farbe der Wolke – wie bei einer gewöhnlichen Wolke – hauptsächlich wegen der Wassertropfen weiß.

2.10 Je nach Explosionshöhe des Atomsprengkörpers und der darunterliegenden Geländeart wird in unmittelbarer Nähe ein starker Aufstrom mit Sogwinden erzeugt, die »Nachwinde« genannt werden. Diese bewirken, daß Staub und Schutt von der Erdoberfläche in die Atomwolke hinaufgesogen werden (Bild 2.10).

2.11 Zunächst trägt die hochsteigende Masse von Sprengkörperrückständen die Teilchen aufwärts, nach einiger Zeit jedoch beginnen diese, unter dem Einfluß der Schwerkraft mit einer ihrer Größe entsprechenden Geschwindigkeit langsam zu fallen. Dadurch bildet sich eine immer länger und breiter werdende wolkenartige (oder Rauch-)Säule. Diese besteht hauptsächlich aus sehr kleinen Teilchen radioaktiver Spaltungsprodukte und Sprengkörperrückstände, Wassertropfen und größe-

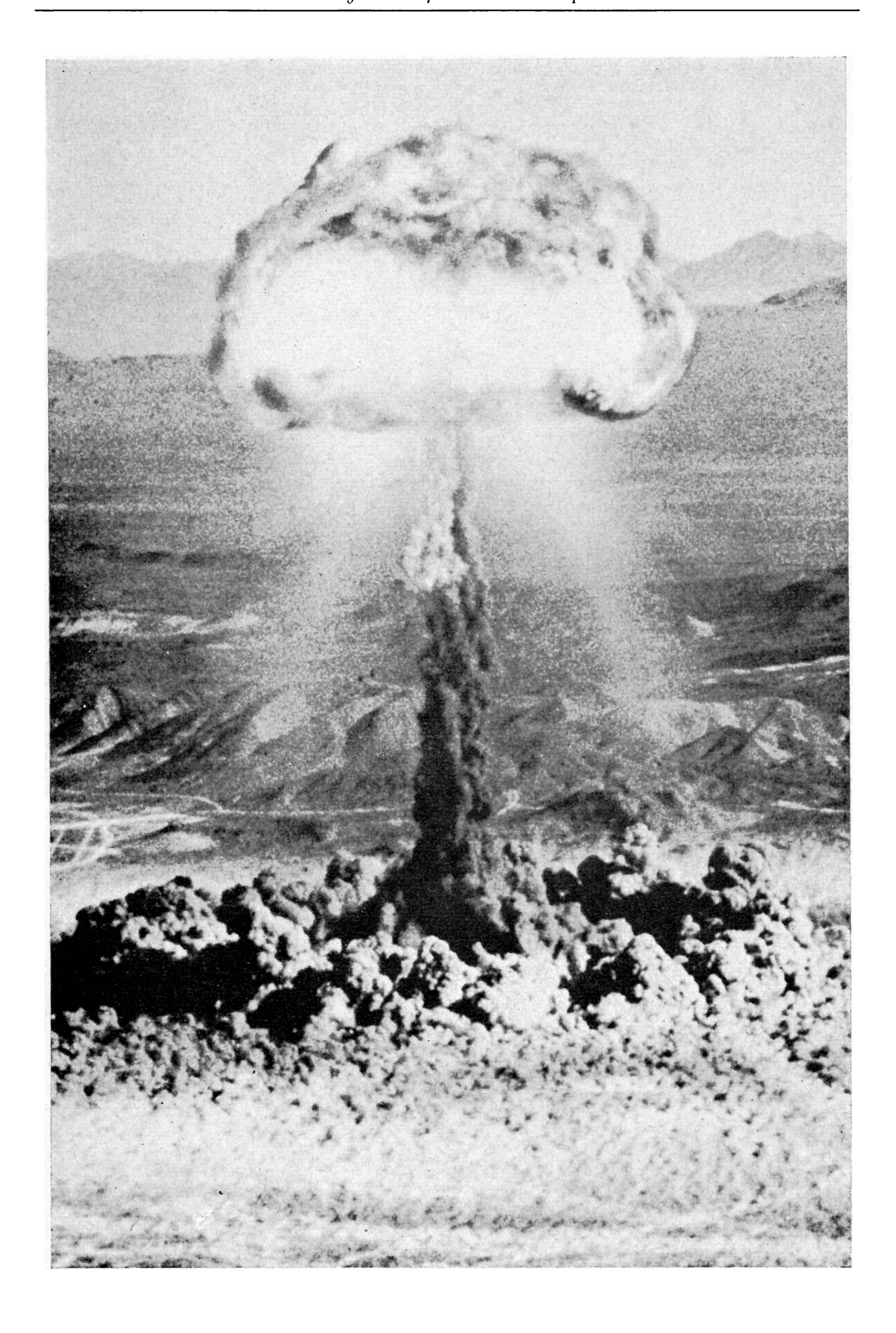


Bild 2.10 Von den Windströmungen einer Luftexplosion hochgesogene Staubwolke

ren Teilchen von Staub und Schutt, die von den Nachwinden aufwärtsgetragen worden sind.

2.12 Die Geschwindigkeit, mit welcher der obere Teil der radioaktiven Wolke weiter aufsteigt, hängt von den Wetterverhältnissen sowie vom Explosionswert des Atomsprengkörpers ab. Eine Vorstellung von der Aufstiegsgeschwindigkeit erhält man aus den Ergebnissen der Tabelle 2.12 und der Kurve in Bild 2.12. Danach wird im allgemeinen die Wolke nach 30 Sekunden eine Höhe von etwa 5 km und nach einer Minute eine Höhe von etwa 7 km erreicht haben. Die durchschnittliche Aufstiegsgeschwindigkeit während der ersten Minute beträgt ungefähr 420 km/Std.

Tabelle 2.12 Aufstiegsgeschwindigkeit der radioaktiven Wolke

Höhe km	Zeit Minuten	Aufstiegsgeschwindigkeit km/Std.
3,2	0,3	480
6,4	0,75	320
9,6	1,4	225
16,0	3,8	145
22,4	6,3	55

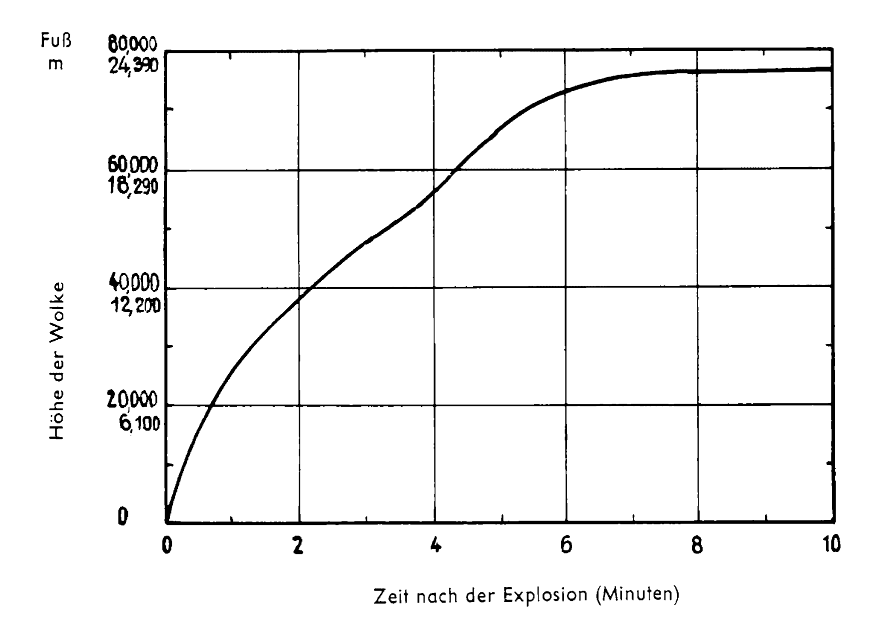


Bild 2.12 Höhe der Wolke über der Explosionshöhe zu verschiedenen Zeiten nach Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers



Bild 2.15 Der bei einer Kernexplosion im Megatonnenbereich entstehende Rauchpilz, aufgenommen aus etwa 3700 m Höhe und etwa 80 km Entfernung

2.13 Die schließlich von der radioaktiven Wolke erreichte Höhe hängt von der Wärmeenergie des Atomsprengkörpers und von dem Temperaturgefälle sowie der Dichte der umgebenden Luft ab. Je größer die freigemachte Wärmemenge, um so größer ist für gewöhnlich der nach oben gerichtete Schub auf Grund des dynamischen Auftriebs, und um so größer ist die Strecke, die die Wolke hochsteigt. Es ist jedoch wahrscheinlich, daß die maximale Höhe, die eine Atomwolke erreichen kann, von der Höhe der Obergrenze der Troposphäre abhängt, d. h. von dem Beginn der Stratosphäre für den Fall, daß die Atomwolken diese Höhe erreichen.

2.14 In der Regel nimmt die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe ab. Unter bestimmten Voraussetzungen jedoch kommt eine »Inversionsschicht« vor, in der die Temperatur mit zunehmender Höhe zu steigen beginnt. Wenn die radioaktive Wolke eine solche Temperatur-Inversionsschicht erreicht, breitet sie sich etwas aus. Jedoch geht der größte Teil der heißen Luftmasse auf Grund des dynamischen Auftriebs durch eine Inversionsschicht hindurch.

2.15 Wenn die Wolke eine Höhe erreicht, in der ihre Dichte die gleiche ist wie die der umgebenden Luft, oder wenn sie die Untergrenze der Stratosphäre erreicht, verlangsamt ein Teil der Wolke seinen Aufstieg und beginnt, sich waagerecht auszubreiten. Dadurch ergibt sich die Bildung der pilzförmigen Wolke, die für Kernexplosionen charakteristisch ist (Bild 2.15). Die maximale Höhe der Unterseite des Pilzkopfes, die innerhalb von etwa 8–10 Minuten erreicht wird, beträgt im allgemeinen 8–16 km. Der Kopf der Wolke steigt noch höher, und zwar nimmt die Höhe mit dem Explosionswert zu. Bei den 1952 und 1954 im Pazifik durchgeführten Versuchen mit Atomsprengkörpern im Megatonnenbereich stieg der Wolkenkopf in Höhen bis zu etwa 40 km. Der Pilz bleibt ungefähr eine Stunde lang sichtbar, bis er vom Wind in die umgebende Atmosphäre verstreut wird und sich mit anderen Wolken am Himmel vermischt.

Die Merkmale einer Bodenexplosion

2.16 Da viele Erscheinungen und Wirkungen einer Bodenexplosion den bei einer Luftexplosion auftretenden ähnlich sind, ist es zweckmäßig, zunächst auf einige der besonderen Merkmale der ersteren näher einzugehen. Bei einer Bodenexplosion

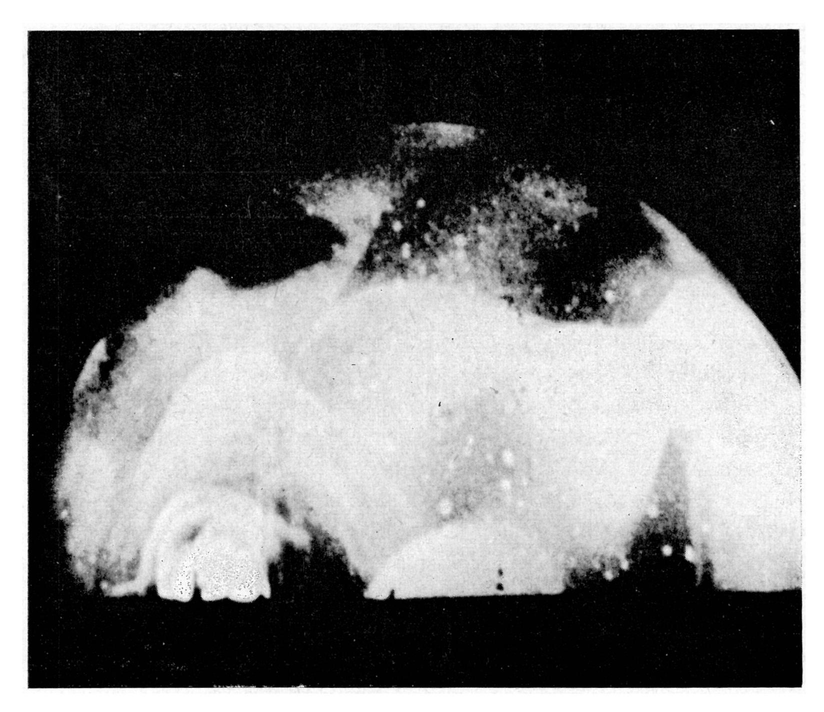


Bild 2.16a Feuerball aus einer Kernexplosion im Megatonnenbereich nahe der Erdoberfläche. Der maximale Durchmesser des Feuerballes betrug 5,2 km

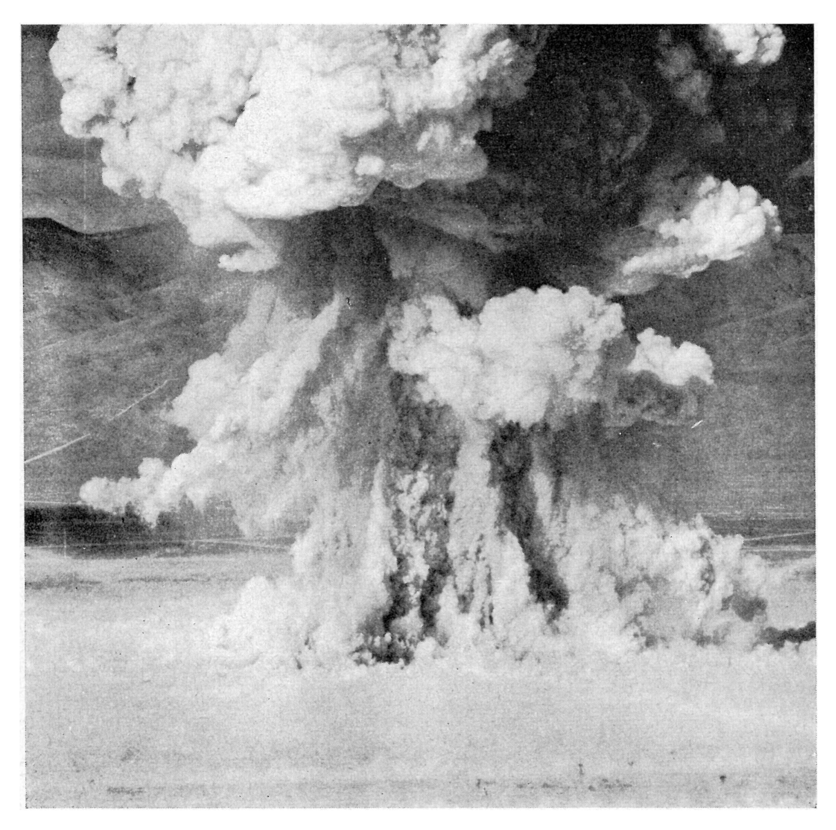


Bild 2.16b Staubwolkenbildung bei einer Bodenexplosion

berührt der Feuerball bei seinem anfänglichen raschen Anwachsen die Erdoberfläche (Bild 2.16a). Durch die starke Wärme verdampft eine beträchtliche Menge Gestein, Erde und anderes in diesem Raum befindliches Material und wird vom Feuerball erfaßt. Man hat geschätzt, daß, wenn nur 5% der Energie eines 1-Mt-Atomsprengkörpers auf diese Weise verbraucht werden, ungefähr 20000 t verdampfte Erdbodenmaterie zu den normalen Bestandteilen des Feuerballes hinzukommen. Außerdem bewirken die starken Winde an der Erdoberfläche, daß beim Aufsteigen des Feuerballes große Mengen Staub, Schutt und sonstige Teilchen hochgesogen werden (Bild 2.16b).

2.17 Deshalb liegt ein wesentlicher Unterschied zwischen Bodenexplosion und Luftexplosion darin, daß bei einer Bodenexplosion die Atomwolke eine sehr viel größere Menge Schutt enthält. Diese besteht aus Teilchen kleinster Größe, die durch die Kondensation bei Abkühlung des Feuerballes entstehen, bis zu viel größeren Teilen, die von den Oberflächenwinden hochgeschleudert worden sind. Die genaue

Zusammensetzung der Wolke hängt natürlich von der Art des Geländes und dem Ausmaß der Bodenberührung des Feuerballes ab.

2.18 Bei einer Bodenexplosion, bei welcher, wie es in mehreren Versuchsexplosionen in Erdbodennähe der Fall war, eine mäßige Menge Schutt vorkommt, ist die Aufstiegsgeschwindigkeit der Wolke weitgehend die gleiche, wie sie vorstehend für eine Luftexplosion angegeben wurde (Tabelle 2.12). Die Atomwolke erreicht eine Höhe von mehreren Kilometern, bevor sie sich zu einer Pilzform ausbreitet (s. Abschn. 2.15).

2.19 Die Verdampfung von Staub und anderer Materie bei Erdbodenberührung des Feuerballes und die Verdrängung von Materie durch die bei der Explosion entstehende Expansionswelle und durch die Winde verursachen eine Kraterbildung. Die Größe des Kraters hängt ab von der Höhe, in welcher der Sprengkörper über dem Erdboden explodiert, sowie von der Bodenart und dem Explosionswert des Atomsprengkörpers. Es wird angenommen, daß bei einem 1-Megatonnen-Atomsprengkörper keine größere Kraterbildung eintritt, sofern die Explosion nicht in einer Höhe von weniger als etwa 135 m erfolgt.

2.20 Explodiert ein Atomsprengkörper nahe der Wasseroberfläche, so verdampfen große Mengen Wasser, die in die Atomwolke hinaufgetragen werden. Wenn z. B. vorstehend (Abschn. 2.16) angenommen wird, daß 5% der Energie des 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers auf diese Weise verbraucht werden, dann werden etwa 100000 t Wasser in Dampf verwandelt. In großen Höhen kondensiert sich dieser und bildet kleine Wassertropfen ähnlich wie bei einer gewöhnlichen atmosphärischen Wolke.

Der radioaktive Niederschlag

2.21 Bei einer Bodenexplosion mischen sich sehr bald große Mengen Erde oder Wasser in den Feuerball und schmelzen oder verdampfen hier. Nachdem eine ausreichende Abkühlung erfolgt ist, vermischen sich durch die Kondensation verdampfter Spaltungsprodukte an geschmolzenen Erdteilchen usw. die Spaltungsprodukte mit den Erdteilchen. Ein kleiner Teil der bei weiterer Abkühlung gebildeten festen Teilchen wird ziemlich gleichmäßig mit radioaktiven Spaltungsprodukten und anderen Sprengkörperrückständen vermischt; in der Hauptsache jedoch stellen wir die Vermischung in einer dünnen Schicht nahe der Oberfläche fest. In Wassertropfen treten die kleinen Spaltungsproduktteilchen an verschiedenen Punkten innerhalb der Tropfen auf. Wenn die heftige Störung auf Grund des explodierenden Atomsprengkörpers nachläßt, fallen die strahlenden Teilchen und Tröpfchen allmählich wieder zur Erde. Diese Wirkung wird »radioaktiver Niederschlag« genannt. Dieser Niederschlag, dessen Radioaktivität eine lange Zeitspanne braucht, bis er abklingt, ist die Hauptquelle der im vorhergehenden Kapitel angeführten Rückstandsstrahlung[1]).

[1]) Eine weitere, aber viel weniger bedeutungsvolle Quelle ist die Radioaktivität, die zur Zeit der Explosion insbesondere in Gebieten nahe dem Explosionspunkt durch Neutronen in verschiedenen Materialien erzeugt wird.

2.22 Das Ausmaß und die Art des radioaktiven Niederschlags können sehr verschiedener Größenordnung sein; sie werden durch ein Zusammenwirken verschiedener Umstände bestimmt, die mit der Energie und Konstruktion des Atomsprengkörpers, der Explosionshöhe, der Art des unter dem Explosionspunkt befindlichen Geländes und den Wetterverhältnissen zusammenhängen. Bei einer Luftexplosion z. B., die in einer größeren Höhe über der Erdoberfläche erfolgt, so daß keine größeren Mengen Staub oder Wasser in die Wolke hineingesogen werden, zerstreuen sich die strahlenden Teilchen weitgehend. Die Gefahr durch radioaktiven Niederschlag ist dann in einem Gebiet mittlerer Größe sehr viel geringer, als wenn es sich um eine Bodenexplosion handeln würde. So gab es in Hiroshima und Nagasaki, wo Atomsprengkörper von etwa 20 kt in etwa 560 m Höhe explodierten, überhaupt keine Verluste durch radioaktiven Niederschlag.

2.23 Dagegen kann eine Bodenexplosion schwere Verstrahlungen durch radioaktiven Niederschlag verursachen. Bei der am 1. März 1954 auf dem Bikini-Atoll erprobten, sehr energiehaltigen thermonuklearen Waffe, die dicht an der Oberfläche einer Koralleninsel explodierte, verursachte der radioaktive Niederschlag eine starke Verstrahlung in einem Gebiet von über 18000 km².

2.24 Das verstrahlte Gebiet war ungefähr zigarrenförmig und erstreckte sich auf etwa 32 km in Gegenwindrichtung und 350 km in Mitwindrichtung. Die Breite quer zur Windrichtung war unterschiedlich; sie betrug maximal fast 65 km. Sowohl die Windrichtung als auch die Windgeschwindigkeit haben – insbesondere in den oberen Luftschichten – einen bedeutenden Einfluß auf die Form und das Ausmaß des verstrahlten Gebietes. Wie wir später noch sehen werden, müssen die Wind-Daten beim Versuch einer Voraussage des radioaktiven Niederschlags nach einer Kernexplosion berücksichtigt werden.

2.25 Es muß bemerkt werden, daß der radioaktive Niederschlag eine abgestufte Erscheinung ist, die sich über einen gewissen Zeitraum erstreckt. Bei der oben erwähnten Bikini-Explosion z. B. verstrichen mehrere (etwa 10) Stunden, bevor die strahlenden Teilchen am Rande des 18000 km² großen Gebietes herniederzufallen begannen. Bis zu diesem Zeitpunkt hatte sich die Atomwolke so verdünnt, daß sie nicht mehr sichtbar war. Dies führt zu der bedeutsamen Feststellung, daß radioaktiver Niederschlag auch vorkommen kann, ohne daß die Atomwolke sichtbar ist. Trotzdem entsteht der größte Teil des radioaktiven Niederschlages im allgemeinen aus den größeren strahlenden Staub- und Schutteilchen, die aus der Pilzwolke in nicht zu großen Entfernungen vom Explosionsbereich fallen. Dies nennt man den »örtlichen Niederschlag«. Es gibt außerdem noch eine andere Art von Niederschlag, der aus winzigen Teilchen besteht, welche sehr langsam herabfallen und schließlich große Flächen gleichmäßig bedecken. Dies ist der »weltweite« Niederschlag, bei dem die Rückstände aus Kernexplosionen aller Typen – in der Luft, am Boden, unter der Erde oder unter Wasser – mitwirken (s. Kap. X).

2.26 Obwohl der thermonukleare Versuch vom 1. März 1954 den umfangreichsten örtlichen Niederschlag erzeugte, der bisher bekannt geworden ist, muß darauf hingewiesen werden, daß die Merkmale nicht unbedingt charakteristisch für thermo-

nukleare Explosionen und auch nicht auf diese beschränkt waren. Es ist sehr wahrscheinlich, daß der örtliche Niederschlag unbedeutend gewesen wäre, wenn der gleiche Atomsprengkörper in einer solchen Höhe über der Koralleninsel explodiert wäre, daß der große Feuerball den Erdboden nicht berührt hätte.

2.27 Natürlich kann unter bestimmten Voraussetzungen selbst bei einer Luftexplosion ein stärkerer örtlicher Niederschlag auftreten. Würde es zur Zeit der Explosion oder bald danach regnen, so würden die Regentropfen einige der radioaktiven Teilchen mit sich führen. Dies war der Fall bei dem ABLE-Test auf Bikini im Juli 1946, als ein Atomsprengkörper von 20 kt einige hundert Meter über der Lagune explodierte. Innerhalb von 2 oder 3 Stunden nach der Explosion entwickelten sich in der Umgebung leichte Regenschauer, und es wurde festgestellt, daß die Regentropfen radioaktiv waren. Das Ausmaß der Radioaktivität war in diesem Falle jedoch verhältnismäßig gering.

Die Druckwelle

2.28 Einen Bruchteil einer Sekunde nach der Explosion entwickelt sich eine Welle hohen Druckes, die sich vom Feuerball nach außen bewegt (Bild 2.28). Dies ist die »Druckwelle«, die nachstehend noch näher erörtert ist; sie ist bei einer Luftexplosion die Ursache starker Zerstörungen. Die Front der Druckwelle, die sog. »Stoßfront«, wandert rasch vom Feuerball fort, wobei sie sich wie eine wandernde Wand hochkomprimierter Luft verhält. Nach Ablauf von 10 Sekunden, wenn der

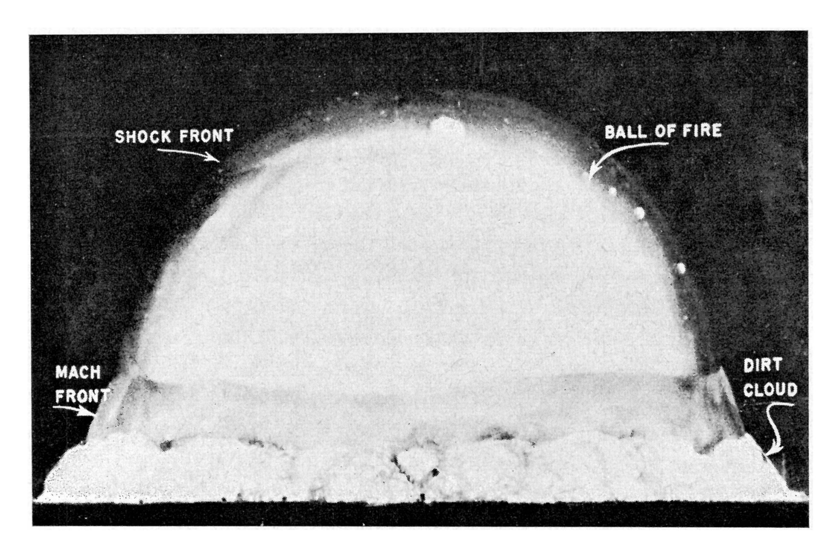


Bild 2.28 Die schwach leuchtende Stoßfront kurz nach ihrer Loslösung vom Feuerball, in geringem Abstand von dessen äußerem Rand erkennbar

Feuerball eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers seine maximale Größe erreicht hat (etwa 2200 m Durchmesser), liegt die Stoßfront gut 5 km weiter vorn. 50 Sekunden nach der Explosion, wenn der Feuerball nicht mehr sichtbar ist, hat die Druckwelle etwa 19 km zurückgelegt. Sie bewegt sich dann mit einer Geschwindigkeit von etwa 350 m/sec, d. i. etwas schneller als die Schallgeschwindigkeit in Meereshöhe.

2.29 Wenn die Druckwelle die Erdoberfläche berührt, wird sie zurückgeworfen, ähnlich wie die Schallwelle bei einem Echo. Diese reflektierte Druckwelle ist ebenso wie die ursprüngliche (oder direkte) Welle imstande, materielle Schäden anzurichten. In einer bestimmten Entfernung an der Oberfläche, deren örtliche Lage hauptsächlich von der Explosionshöhe und dem Explosionswert des Atomsprengkörpers abhängt, vereinigen sich die direkte und die reflektierte Stoßfront. Diese Fusionserscheinung wird der »Machsche Effekt« genannt. Der »Überdruck«, d. h. der über den normalen Luftdruck hinausgehende, ist an der Front der Machschen Welle im allgemeinen etwa 2mal so groß wie an der direkten Stoßfront.

2.30 Bei einer typischen Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers (s. Abschn. 2.47) beginnt der Machsche Effekt etwa 5 Sekunden nach der Explosion in einem Umkreis von etwa 2 km vom Nullpunkt. Der Begriff »Nullpunkt« bedeutet den Punkt an der Erdoberfläche, der unmittelbar unter (oder über) dem Explosionspunkt liegt[1]).

2.31 Zunächst ist die Höhe der Machschen Front gering, sie nimmt aber ständig zu, wenn die Stoßfront sich weiter nach außen bewegt. Gleichzeitig jedoch nimmt der Überdruck – genau wie der in der ursprünglichen Stoßwelle – wegen des fortlaufenden Energieverlustes und der ständig zunehmenden Fläche der vordringenden Front entsprechend ab. Nach Ablauf von etwa 40 Sekunden, wenn die Machsche Front aus einem 1-Megatonnen-Atomsprengkörper 16 km vom Nullpunkt entfernt ist, hat sich der Überdruck auf etwa 0,070 kg/cm² verringert[2]).

2.32 Die Entfernung vom Nullpunkt, in welcher der Machsche Effekt beginnt, ist je nach Explosionshöhe verschieden. So war, wie aus Bild 2.28 ersichtlich, bei der in geringer Höhe erfolgenden Explosion in dem Trinity-(Alamogordo-)Test die Machsche Front sichtbar, als die direkte Stoßfront sich nur wenige Meter vom Feuerball entfernt hatte. Dagegen ist es möglich, daß bei einer Explosion in sehr großer Höhe kein spürbarer Machscher Effekt auftritt.

2.33 Außer dem Erdbodenwind (oder den Windströmungen) auf Grund des durch den steigenden Feuerball verursachten Aufstroms (s. Abschn. 2.10) sind mit dem Auftreten der Stoß- (und der Machschen) Front starke vorübergehende Winde verbunden. Diese können an Punkten in der Nähe des Nullpunktes eine Spitzengeschwindigkeit von mehreren hundert km/Std. haben; selbst mehr als 10 km von der Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers kann die Spitzengeschwindigkeit über 110 km/Std. betragen. Es ist offensichtlich, daß so starke Winde zu den Luftdruckschäden nach einer Luftexplosion weitgehend beitragen können.

---

[1]) In manchen Veröffentlichungen wird der Nullpunkt auch »Hypozentrum« der Explosion genannt.

[2]) Der normale Luftdruck in Meereshöhe beträgt 1 kg/cm².

Thermische Strahlung

2.34 Unmittelbar nachdem sich der Feuerball gebildet hat, beginnt er, thermische Strahlen auszusenden. Diese bestehen auf Grund der sehr hohen Temperaturen aus ultravioletten Strahlen (mit kurzer Wellenlänge) sowie aus sichtbaren und infraroten Strahlen (mit langer Wellenlänge). Die Oberflächentemperatur verändert sich auf Grund bestimmter, mit der Absorption der thermischen Strahlung durch die Luft vor dem Feuerball (s. Abschn. 2.76ff.) zusammenhängender Erscheinungen in seltsamer Weise. Die Temperatur im Innern des Feuerballes fällt ständig, aber seine Oberflächentemperatur nimmt während eines kleinen Bruchteils einer Sekunde rascher ab. Dann steigt die scheinbare Oberflächentemperatur wieder während eines etwas längeren Zeitraums, wonach sie ununterbrochen fällt (s. Bild 2.92). Mit anderen Worten: es sind zwei Oberflächentemperatur-Impulse vorhanden; der erstere ist von sehr kurzer Dauer, während der letztere viel länger andauert. Dies Verhalten tritt ganz allgemein auf, obwohl die Zeitdauer der Impulse mit dem Explosionswert zunimmt.

2.35 Entsprechend den zwei Temperaturimpulsen haben wir auch zwei thermische Strahlungs-(Emissions-)Impulse aus dem Feuerball (s. Bild 2.35). Bei dem ersten Impuls, der bei Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers etwa $^1/_{10}$ Sekunde dauert, sind die Temperaturen meist sehr hoch. Daher ist ein großer Teil der bei diesem Impuls ausgesandten Strahlung ultraviolett. Eine mittlere Dosis ultravioletter

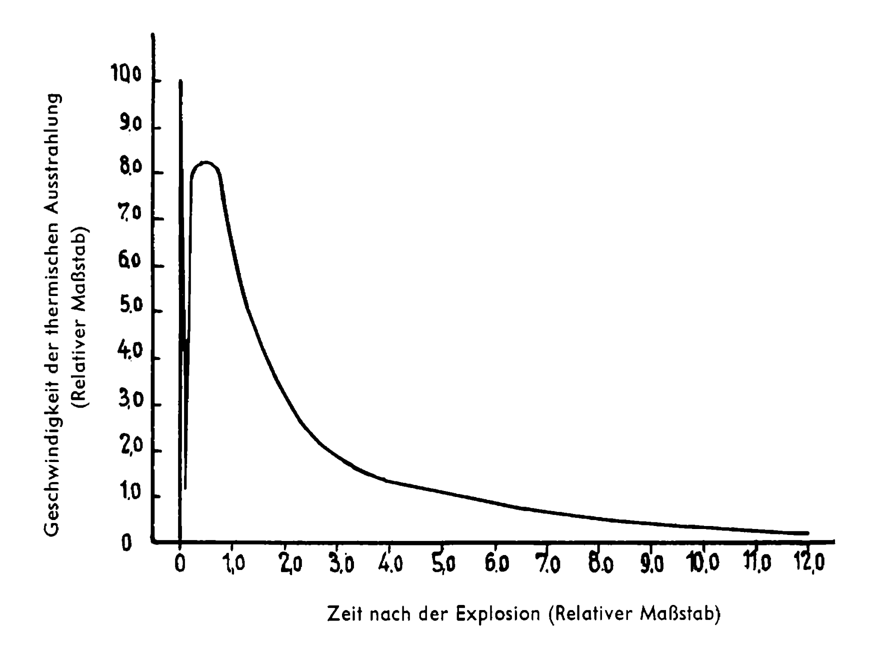


Bild 2.35 Thermische Strahlungsemission in zwei Impulsen

Strahlung kann schmerzhafte Blasen auf der Haut hervorrufen, und schon eine kleine Dosis kann eine Rötung der Haut verursachen. In den meisten Fällen jedoch stellt der erste Impuls der thermischen Strahlung aus bestimmten Gründen keine besondere Gefahr in bezug auf Hautverbrennungen dar: erstens tritt wegen der kurzen Dauer des ersten Impulses nur etwa 1% der thermischen Strahlung in Erscheinung; zweitens werden die ultravioletten Strahlen sofort von der dazwischenliegenden Luft abgeschwächt, so daß die in einer gewissen Entfernung von der Explosion empfangene Strahlungsdosis verhältnismäßig gering sein kann. Ferner hat es den Anschein, daß die ultraviolette Strahlung aus dem ersten Impuls nur in Bereichen, in denen andere Strahlungswirkungen viel gefährlicher sind, größere Wirkungen auf die menschliche Haut ausüben kann.

2.36 In bezug auf den zweiten Impuls verhält es sich jedoch ganz anders. Dieser Impuls kann mehrere Sekunden andauern; er enthält etwa 99% der gesamten thermischen Strahlungsenergie des Atomsprengkörpers. Da die Temperaturen niedriger sind als im ersten Impuls, bestehen die meisten der die Erde erreichenden Strahlen aus sichtbarem und infrarotem (unsichtbaren) Licht. Diese Strahlung ist die Hauptursache für Hautverbrennungen verschiedenen Grades bei Menschen, die in einer Entfernung von 20 km oder mehr von der Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers dieser Strahlung ausgesetzt sind. Bei Atomsprengkörpern größerer Explosionswerte ist – wie in Kapitel VII dargelegt – der Schadensbereich größer. Die Strahlung aus dem 2. Impuls kann bei geeigneten Voraussetzungen auch Brände entfachen.

Anfangsstrahlung

2.37 Wie in Kap. I gesagt, ist die Explosion eines Atomsprengkörpers mit der Aussendung verschiedener Kernstrahlen verbunden. Diese bestehen aus Neutronen, Gammastrahlen sowie Alpha- und Betateilchen. Fast alle Neutronen und ein Teil der Gammastrahlen werden während des eigentlichen Spaltungsprozesses ausgesandt, d. h., diese Strahlen werden gleichzeitig mit der Kernexplosion erzeugt. Einige der bei der Spaltung freigemachten Neutronen werden von verschiedenen in dem Atomsprengkörper vorhandenen Kernen sofort absorbiert (oder eingefangen); bei diesem Prozeß werden für gewöhnlich ebenfalls Gammastrahlen unmittelbar ausgesandt. Der Rest der Gammastrahlen und der Betateilchen wird innerhalb einer bestimmten Zeit freigemacht, wenn die Spaltungsprodukte dem radioaktiven Zerfall ausgesetzt sind. Die Alphateilchen werden in ähnlicher Weise durch den Zerfall des Urans oder Plutoniums ausgestoßen, das der Spaltung in dem Atomsprengkörper entgangen ist.

2.38 Die Anfangsstrahlung wird allgemein definiert als Strahlung, die sowohl vom Feuerball als auch von der Atomwolke innerhalb der ersten Minute nach der Explosion ausgesandt wird. Sie besteht aus Neutronen und Gammastrahlen, die fast augenblicklich freigemacht werden, sowie aus den Gammastrahlen, die von den radioaktiven Spaltungsprodukten in der aufsteigenden Wolke ausgesandt werden. Es ist festzustellen, daß die Alpha- und Betateilchen nicht berücksichtigt sind, obwohl sie

in der Anfangsstrahlung enthalten sind. Der Grund hierfür liegt darin, daß sie so leicht absorbiert werden, daß sie bis höchstens einige Meter von der Atomwolke reichen.

2.39 Dem etwas willkürlich gewählten Zeitraum von einer Minute für die Dauer der Anfangsstrahlung war ursprünglich folgende Betrachtung zugrunde gelegt: infolge der durch die Luft erfolgenden Abschwächung beträgt der Wirkungsbereich der Gammastrahlen aus der Spaltung und der Gammastrahlen aus den Spaltungsprodukten der Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers ungefähr 3 km. Mit anderen Worten: die aus einer solchen Quelle stammenden Gammastrahlen sind in einer Höhe von mehr als 3 km unbedeutend in bezug auf ihre Wirkung an der Erdoberfläche. So sind also die Wirkungen der Anfangsstrahlung nicht mehr von Bedeutung, wenn die Atomwolke eine Höhe von 3 km erreicht hat. Da es rund eine Minute dauert, bis die Wolke in diese Höhe aufgestiegen ist, hat man die Anfangsstrahlung als die Kernstrahlung definiert, die in der ersten Minute nach der Explosion ausgesandt wird.

2.40 Die vorstehenden Ausführungen beruhen auf den Merkmalen eines 20-kt-Atomsprengkörpers. Bei einem Atomsprengkörper von größerem Explosionswert ist die maximale Entfernung, innerhalb welcher die Gammastrahlen wirksam sind, größer als oben angegeben. Gleichzeitig jedoch steigert sich die Geschwindigkeit, mit der die Wolke aufsteigt. Ebenso ist bei einem Atomsprengkörper von geringerem Explosionswert der Wirkungsbereich geringer; das gleiche gilt aber auch für die Steiggeschwindigkeit der Wolke. Der Zeitraum, auf den sich die Anfangsstrahlung erstreckt, kann deshalb als ungefähr gleich angenommen werden, nämlich 1 Minute, ohne Rücksicht auf den Explosionswert des Atomsprengkörpers.

2.41. Die Neutronen sind die einzigen bedeutsamen Kernstrahlungen, die direkt bei den thermonuklearen Reaktionen erzeugt werden (s. Abschn. 1.55). Alphateilchen (Heliumkerne) entstehen ebenfalls, sie wandern aber nicht weit von der Explosion fort. Einige der Neutronen entweichen, andere aber werden von den verschiedenen in dem explodierenden Atomsprengkörper vorhandenen Kernen eingefangen. Diese von spaltbaren Stoffen absorbierten Neutronen können die Freisetzung weiterer Neutronen sowie die Aussendung von Gammastrahlen zur Folge haben (vgl. die vorstehenden Ausführungen bezüglich eines gewöhnlichen durch Kernspaltung explodierenden Atomsprengkörpers). Außerdem ist das Einfangen von Neutronen bei Nichtspaltungsreaktionen im allgemeinen von Gammastrahlen begleitet. Wir sehen also, daß die Anfangsstrahlung aus einem Atomsprengkörper, bei welcher sowohl Spaltungs- als auch Verschmelzungsprozesse (thermonukleare Prozesse) auftreten, im wesentlichen aus Neutronen und Gammastrahlen besteht. Das Mengenverhältnis dieser beiden Strahlungen zueinander mag etwas anders sein als bei einem Atomsprengkörper, bei dem die gesamte Energiefreisetzung auf Spaltung beruht; für die gegenwärtigen Zwecke jedoch kann dieser Unterschied außer acht gelassen werden.

Sonstige Erscheinungen bei Kernexplosionen

2.42 Bei einer Kernexplosion in der Luft tritt eine Anzahl interessanter Erscheinungen auf, die erwähnenswert sind, obwohl sie nicht mit den zerstörenden oder sonstigen schädlichen Wirkungen des Atomsprengkörpers zusammenhängen. Bald nach der Explosion kann man in einiger Entfernung vom Feuerball, insbesondere nachts oder bei trübem Tageslicht, einen violettfarbigen Schein beobachten. Dieses Glühen hält ziemlich lange Zeit an und ist in der Nähe des oberen Teils der Atomwolke deutlich sichtbar. Man glaubt, daß dies das letzte Zeichen einer langen Reihe von Prozessen ist, die durch die Einwirkung der Gammastrahlen auf den Stickstoff und den Wasserstoff der Luft ausgelöst werden.

2.43 Eine weitere bald nach der Explosion unter bestimmten Voraussetzungen auftretende Erscheinung ist die Bildung einer »Kondensationswolke«. Diese wird manchmal auch »Wilsonsche Wolke« (oder Nebelkammerwirkung) genannt, weil sie das Ergebnis ähnlicher Umstände ist, wie sie von den Wissenschaftlern in der Wilsonschen Nebelkammer nutzbar gemacht werden. Wir werden in Kap. III sehen, daß auf die Stoßfront hohen Druckes in der Luft eine Verdünnungs- (oder Sogwelle) folgt. Während der Druck-(oder Luftstoß-)Phase steigt die Lufttemperatur an, und während der Dekompressions-(oder Sog-)Phase fällt sie. Bei ziemlich niedrigen Luftstoßdrücken kann die Temperatur unter ihren ursprünglichen Wert vor dem Stoß absinken, so daß eine Kondensation und Wolkenbildung erfolgt, wenn die Luft eine größere Menge Wasserdampf enthält.

2.44 Die Kondensationswolke, die bei dem ABLE-Test auf Bikini im Jahre 1946 deutlich beobachtet wurde, ist in Bild 2.44 dargestellt. Da der Atomsprengkörper genau über der Oberfläche der Lagune explodierte, war die Luft nahezu mit Wasserdampf gesättigt, und die Voraussetzungen für die Bildung einer Wilsonschen Wolke waren gegeben. Man ersieht aus der Photographie, daß die Wolke sich etwas über dem Feuerball bildet. Dies liegt daran, daß die Stoßfront eine beträchtliche Entfernung zurücklegen muß, bevor der Luftdruck genügend nachgelassen hat, um in der nachfolgenden Sogphase eine niedrige Temperatur zu erzeugen. Zu dem Zeitpunkt, da die Temperatur so weit gefallen ist, daß eine Kondensation eintritt, hat sich die Stoßfront noch weiter fortbewegt, wie aus Bild 2.44 ersichtlich ist. Die scheibenartige Form auf der Wasseroberfläche zeigt den Durchgang der Stoßwelle an.

2.45 Da eine verhältnismäßig große Luftfeuchtigkeit vorhanden sein muß, sind die Voraussetzungen für die Bildung der Kondensationswolke bei Kernexplosionen, die über (oder unter) Wasser erfolgen – wie dies bei den Bikini-Tests im Jahre 1946 der Fall war –, äußerst günstig. Die Wolke begann sich 1 bis 2 Sekunden nach der Explosion zu bilden; sie hatte sich innerhalb einer weiteren Sekunde aufgelöst, als die Luft sich erwärmte und die Wassertröpfchen verdampften. Die ursprünglich kuppelförmige Wolke verwandelte sich zunächst in eine Ringform, wie aus Bild 2.45 ersichtlich, und verschwand dann.

2.46 Da die Wilsonsche Kondensationswolke sich bildet, nachdem der Feuerball den größten Teil seiner thermischen Strahlung ausgesandt hat, hat sie wenig Einfluß

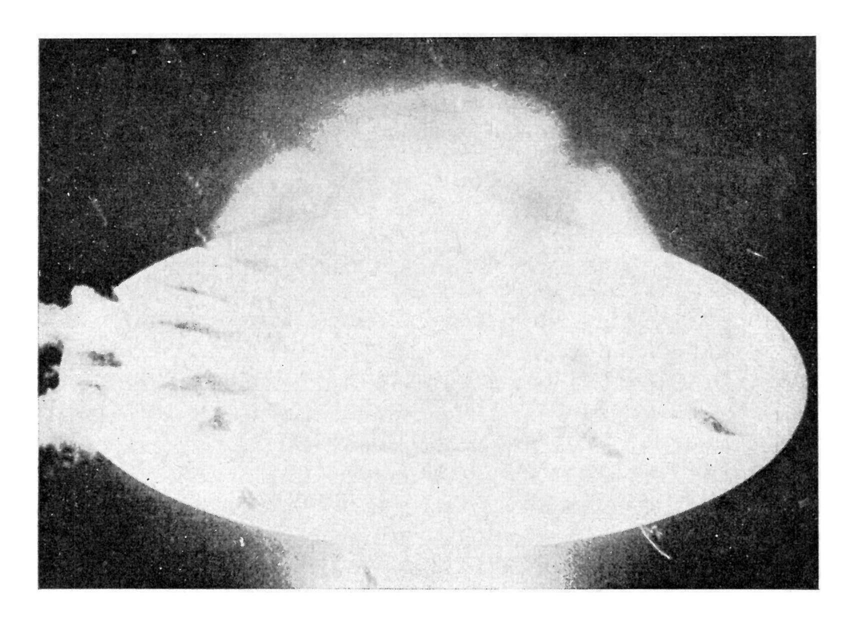


Bild 2.44 Bei einer Luftexplosion über dem Wasser gebildete Kondensationswolke

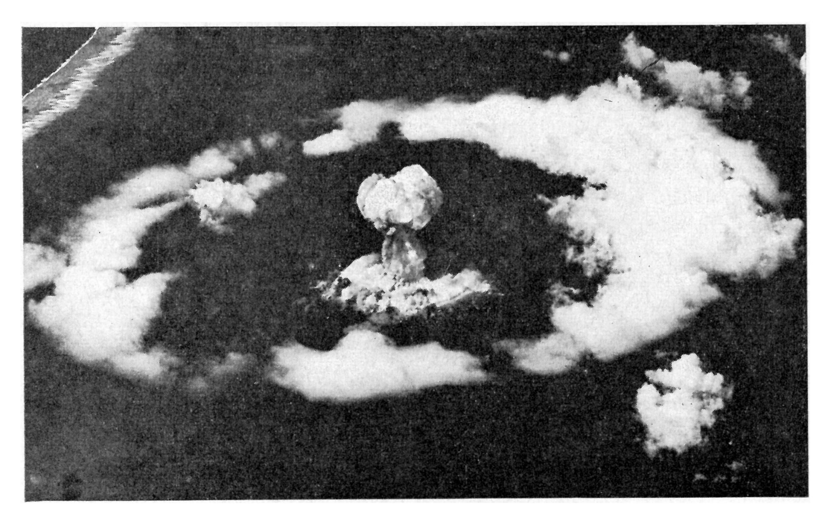


Bild 2.45 Letztes Stadium der Kondensationswolke bei einer Luftexplosion über dem Wasser

auf diese Strahlung. Es können zwar ziemlich dicke Wolken, insbesondere Rauchwolken, die thermische Strahlung abschwächen, welche die Erde aus dem Feuerball erreicht; jedoch abgesehen davon, daß die Kondensationswolke sich zu einem zu späten Zeitpunkt bildet, ist sie auch zu dünn, um in diesem Zusammenhang eine nennenswerte Wirkung auszuüben.

Chronologische Entwicklung einer Luftexplosion

2.47 In Bild 2.47a bis 2.47e sind die Hauptpunkte der vorstehenden Beschreibung einer Luftexplosion zusammengefaßt. Sie zeigen die chronologische Entwicklung der verschiedenen Erscheinungen, die mit einer »typischen« Luftexplosion verbunden sind; (hierunter versteht man eine Explosion in einer Höhe über dem Erdboden, bei der in einer Stadt mittlerer Größe ein Höchstgrad an Zerstörungen entsteht). Auf Grund bestimmter einfacher Regeln, der sog. Umrechnungsgesetze (s. Kap. III), kann man die Zeiten und Entfernungen für zwei verschiedene Explosionswerte, nämlich für einen 20-kt- und einen 1-Mt-Atomsprengkörper, auf einer einzigen Zeichnung darstellen.

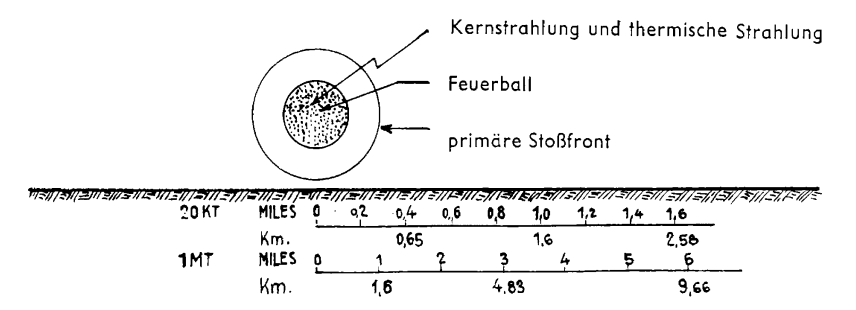


Bild 2.47a Chronologische Entwicklung einer Luftexplosion: 0,5 Sekunden nach Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers und 1,8 Sekunden nach Explosion eines 1-Mt-Atomsprengkörpers

Unmittelbar nach der Explosion eines Atomsprengkörpers in der Luft bildet sich ein sehr heißer, leuchtender (gasförmiger) Feuerball. Auf Grund seiner außerordentlich hohen Temperatur sendet er thermische (oder Wärme-)Strahlen aus, die noch auf große Entfernungen Hautverbrennungen verursachen und entflammbares Material in Brand setzen können. Die Kernprozesse, die die Explosion und den radioaktiven Zerfall der Spaltungsprodukte verursachen, sind von schädlichen Kernstrahlen (Gammastrahlen und Neutronen) begleitet, die auch einen großen Wirkungsbereich in der Luft haben. Sehr bald nach der Explosion entwickelt sich eine zerstörende Stoß- (oder Druck-)Welle in der Luft, die sich rasch von dem Feuerball fortbewegt.

Zu den angegebenen Zeiten hat der Feuerball fast seinen größten Umfang erreicht, wie aus den nachstehenden Ziffern hervorgeht:

	Durchmesser des Feuerballes	
	20-kt-Atomsprengkörper	1-Mt-Atomsprengkörper
zu der angegebenen Zeit	445 m	1900 m
maximal	470 m	2200 m

Wir sehen, daß die Stoßfront in der Luft weit vor dem Feuerball liegt, und zwar etwa 230 m bei Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers und etwa 800 m bei Explosion eines 1-Mt-Atomsprengkörpers.

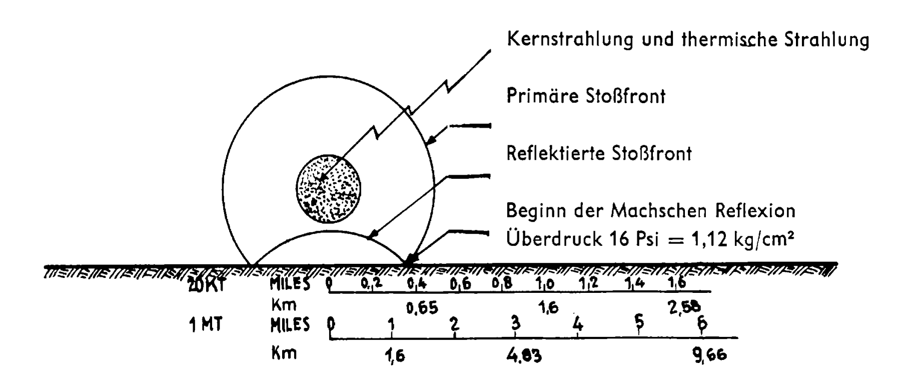


Bild 2.47 b *Chronologische Entwicklung einer Luftexplosion: 1,25 Sekunden nach Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers und 4,6 Sekunden nach Explosion eines 1-Mt-Atomsprengkörpers*

Wenn die primäre Stoß-(oder Luftdruck-)Welle aus der Explosion den Erdboden berührt, wird durch Reflexion eine weitere Stoß-(oder Luftdruck-)Welle erzeugt. Bei einer bestimmten Entfernung vom Nullpunkt, die von der Explosionshöhe und dem Explosionswert abhängt, vereinigen sich die primäre und die reflektierte Stoßfront in der Nähe des Erdbodens und bilden eine einzige, verstärkte Machsche Front (oder Stamm).

Die Zeit und die Entfernung, in welcher der Machsche Effekt bei einer typischen Luftexplosion beginnt, sind folgende:

Explosionswert	Zeit nach der Explosion (Sekunden)	Entfernung vom Nullpunkt (m)
20 kt	1,25	565
1 Megatonne	4,6	2090

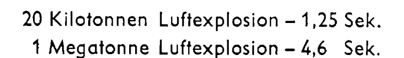
Der Überdruck an der Erdoberfläche beträgt dann 1,120 kg/cm².

Bedeutende Mengen thermische und Kernstrahlen werden weiterhin von dem Feuerball ausgestrahlt.

Mit fortschreitender Zeit breitet sich die Machsche Front (oder der Machsche Stamm) nach außen aus und nimmt an Höhe zu. Die Entfernungen vom Nullpunkt und die Höhe der Machschen Front sind zu den angegebenen Zeiten folgende:

Explosionswert	Zeit nach der Explosion (Sekunden)	Entfernung vom Nullpunkt (m)	Höhe der Machschen Front (m)
20 kt	3	1400	56
1 Megatonne	11	5150	207

Der Überdruck an der Machschen Front beträgt 0,420 kg/cm², und die Windgeschwindigkeit unmittelbar hinter der Front beträgt 290 km/Std.



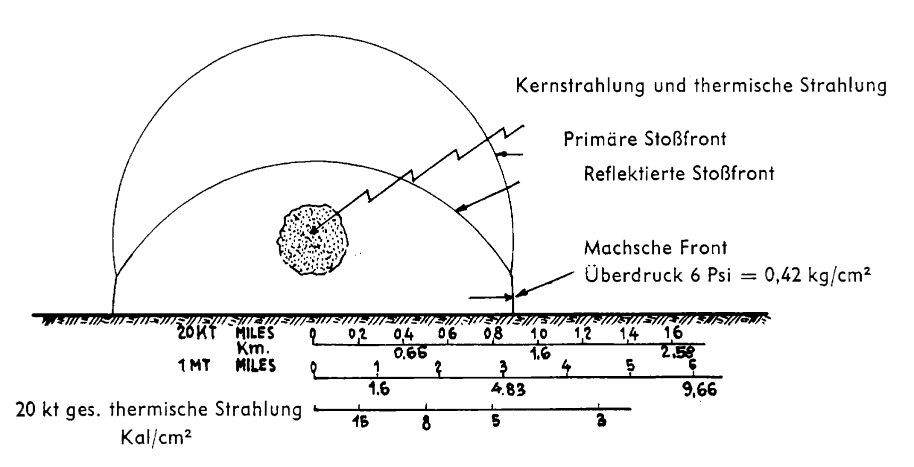


Bild 2.47c Chronologische Entwicklung einer Luftexplosion: 3 Sekunden nach Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers und 11 Sekunden nach Explosion eines 1-Mt-Atomsprengkörpers

Die Kernstrahlen erreichen noch weiter die Erde in bedeutenden Mengen. Jedoch hat sich 3 Sekunden nach der Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers der Feuerball, der zwar immer noch sehr heiß ist, so weit abgekühlt, daß die thermische Strahlung nicht mehr von Bedeutung ist. Die gesamten bei verschiedenen Entfernungen vom Nullpunkt empfangenen Strahlungsmengen nach Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers in der Luft sind in Kalorien/cm² auf der Skala am Fuße des Bildes 2.47c angegeben. (Weitere Einzelheiten s. Kap. VII.) 11 Sekunden nach der Explosion werden immer noch erhebliche Mengen an thermischer Strahlung von dem Feuerball eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers ausgesandt. Die thermische Strahlung erstreckt sich auf ein längeres Zeitintervall als bei Explosion eines Atomsprengkörpers von geringerem Explosionswert.

10 Sekunden nach Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers erreicht die Machsche Front 4000 m vom Nullpunkt, und 37 Sekunden nach Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers hat sie 15300 m vom Nullpunkt erreicht. Der Überdruck an der Front beträgt in beiden Fällen ungefähr 0,07 kg/cm², und die Windgeschwindigkeit

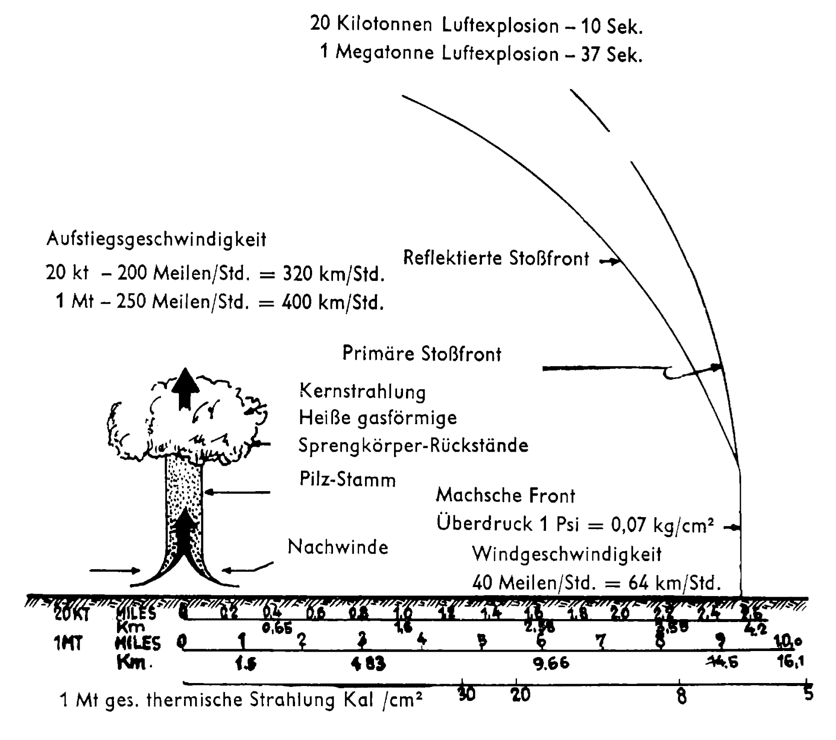


Bild 2.47 d *Chronologische Entwicklung einer Luftexplosion: 10 Sekunden nach Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers und 37 Sekunden nach Explosion eines 1-Mt-Atomsprengkörpers*

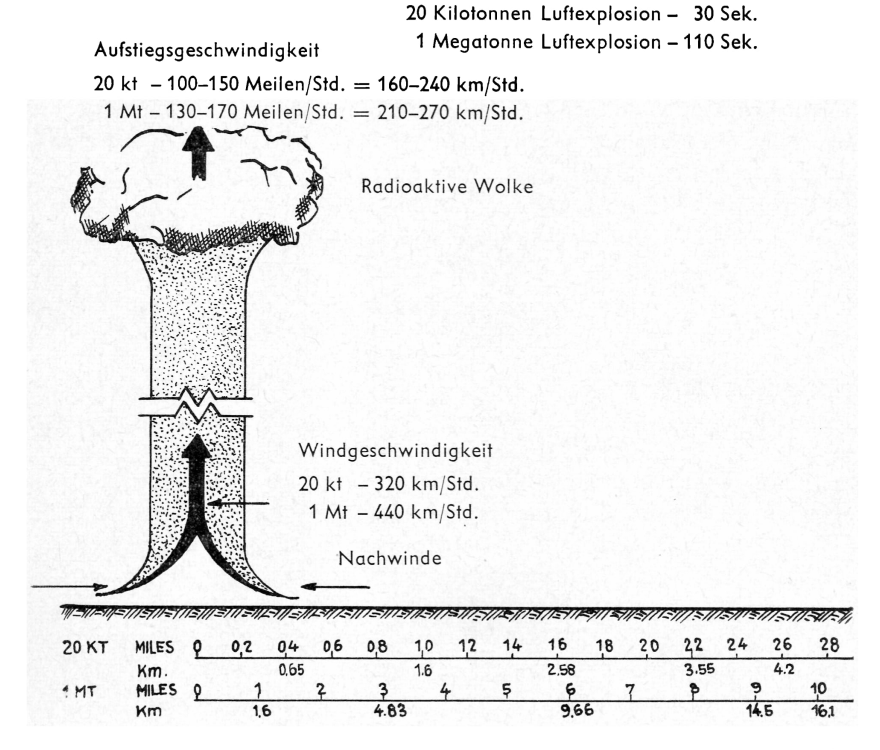


Bild 2.47 e *Chronologische Entwicklung einer Luftexplosion: 30 Sekunden nach Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers und 110 Sekunden nach Explosion eines 1-Mt-Atomsprengkörpers*

hinter der Front beträgt 64 km/Std. Abgesehen von Putzschäden und zerbrochenen Fensterscheiben ist die zerstörende Wirkung der Druckwelle im wesentlichen vorüber. Die thermische Strahlung ist selbst bei Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers nicht mehr von Bedeutung. Die gesamten Strahlungsmengen in verschiedenen Entfernungen sind auf der Skala am Fuße des Bildes 2.47 d angegeben. Die Kernstrahlung jedoch kann den Erdboden immer noch in erheblichem Ausmaße erreichen; bei diesen Strahlen handelt es sich hauptsächlich um Gammastrahlen aus den Spaltungsprodukten.

Der Feuerball leuchtet nun nicht mehr, ist aber noch sehr heiß und verhält sich wie ein Heißluftballon, der mit großer Geschwindigkeit aufsteigt. Bei seinem Aufsteigen bewirkt er, daß Luft nach innen und nach oben gesogen wird, etwa ähnlich der Saugwirkung eines Kamins. Dadurch werden starke Luftströmungen erzeugt, sog. »Nachwinde«, die Staub und Schutt von der Erdoberfläche hochziehen und die Säule bilden, aus der sich schließlich der charakteristische Rauchpilz entwickelt.

Die heißen Rückstände des Atomsprengkörpers steigen immer noch weiter hoch, wobei sie sich gleichzeitig ausdehnen und abkühlen. Dadurch kondensieren sich die verdampften Spaltungsprodukte und andere Sprengkörperrückstände zu einer Wolke hochradioaktiver Teilchen. Die Nachwinde, die eine Geschwindigkeit von 320 km/Std. haben, wirbeln weiter eine Säule von Staub und Schutt hoch, die sich später mit der radioaktiven Wolke vereinigt und die charakteristische Pilzform bildet. Zu den angegebenen Zeiten steigt die Wolke aus der Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers etwa 2400 m und aus einem 1-Megatonnen-Atomsprengkörper etwa 11300 m hoch. Innerhalb von etwa 10 Minuten erreicht die Unterseite des Pilzkopfes eine Höhe von 8000 bis 24000 m je nach dem Explosionswert. Der obere Teil der Wolke steigt sogar noch höher. Schließlich werden die Teilchen in der Wolke durch den Wind verstreut, und es tritt – außer bei solchen Wetterverhältnissen, die mit Niederschlägen verbunden sind – kein nennenswerter örtlicher Niederschlag auf.

Obwohl die Atomwolke noch stark radioaktiv ist, erreicht nur ein geringer Teil der atomaren Strahlen den Erdboden. Der Grund hierfür ist die größere Entfernung der Wolke von der Erdoberfläche und das Nachlassen der Wirksamkeit der Spaltungsprodukte auf Grund des natürlichen radioaktiven Zerfalls.

2.48 Es ist festzustellen, daß die Zeichnungen nur schematische Darstellungen sind und nicht das zeigen, was man sehen kann. Alles, was mit dem Auge wahrnehmbar ist – falls es nicht durch die Helligkeit geblendet ist –, sind der Feuerball und die Atomwolke. (Die Wilsonsche Kondensationswolke ist nicht dargestellt, da hierfür ein hoher Feuchtigkeitsgehalt erforderlich ist und da sie auch praktisch nicht von Bedeutung ist.)

Der beim Durchgang des Stoßes auftretende Luftdruck ist fühlbar, und die Haut ist gegen die thermische Strahlung empfindlich, aber keiner der menschlichen Sinne kann Kernstrahlungen mittlerer Dosis wahrnehmen. Bei sehr großen Dosen jedoch verursachen die Kernstrahlen ein Jucken und Prickeln auf der Haut.

Beschreibung einer Unterwasserexplosion

Die Erscheinungen einer Unterwasserexplosion

2.49 Obwohl mit einer atomaren Unterwasserexplosion bestimmte charakteristische Erscheinungen verbunden sind, hängen die näheren Einzelheiten doch zweifellos vom Explosionswert des Atomsprengkörpers, von der Entfernung unter der Oberfläche, in welcher die Explosion erfolgt, sowie von der Tiefe und der Flächengröße des Gewässers ab. Der hier gegebenen Beschreibung liegen die Beobachtungen zugrunde, die bei dem *Baker*-Versuch auf Bikini im Jahre 1946 gemacht worden sind. Bei diesem Versuch wurde ein 20-kt-Atomsprengkörper ziemlich tief unter der Oberfläche einer etwa 60 m tiefen Lagune zur Explosion gebracht. Im Jahre 1955 wurde

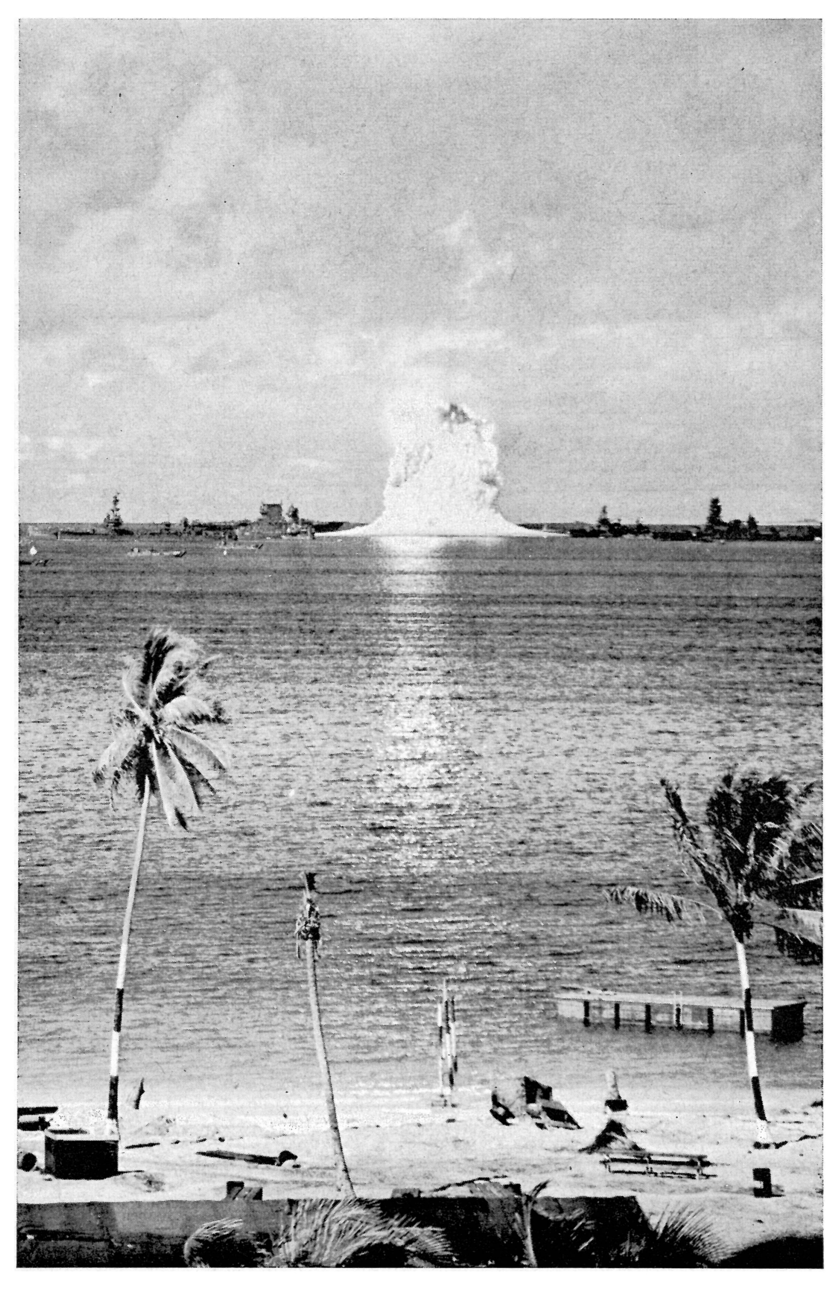


Bild 2.52 *Der »Sprühdom«, der sich bei einer Unterwasserexplosion über dem Explosionspunkt gebildet hat*

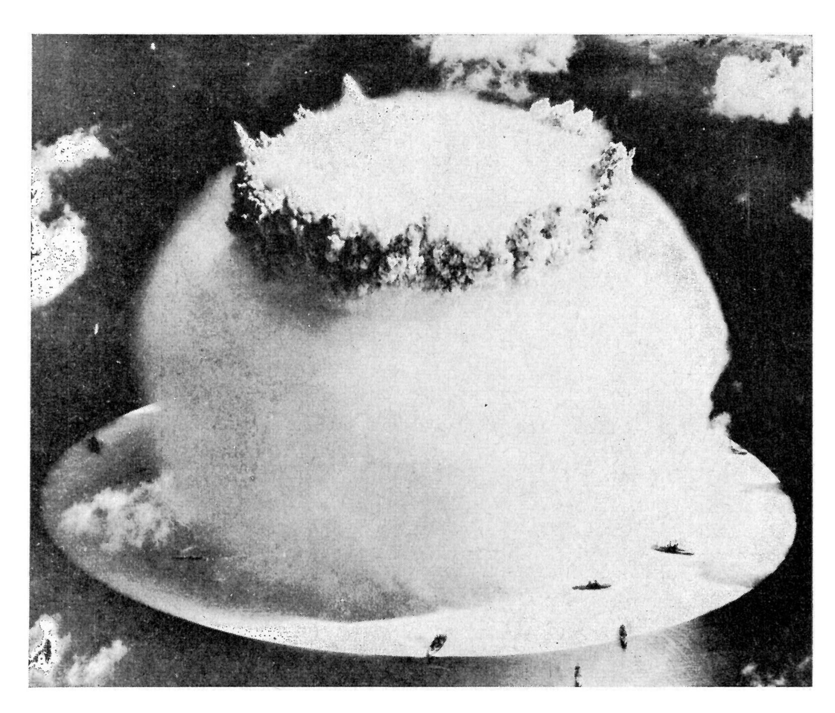


Bild 2.53a *Die Kondensationswolke, die sich nach einer in nicht sehr großer Tiefe durchgeführten Unterwasserexplosion gebildet hat. (Der durch die Stoßwelle entstandene »Gischt« ist auf der Wasseroberfläche zu sehen.)*

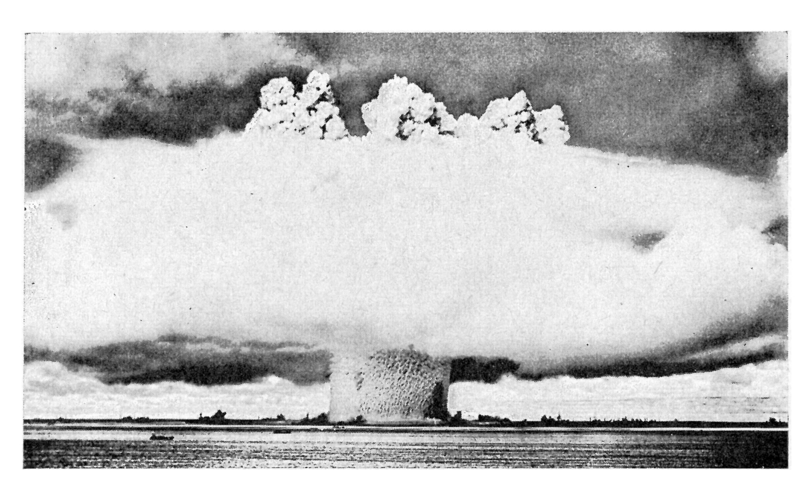


Bild 2.53b *Die Bildung der Hohlsäule bei einer Unterwasserexplosion; der obere Teil ist von der letzten Phase der Kondensationswolke umgeben.*

ein Kernaggregat tief unter Wasser zur Explosion gebracht, jedoch waren die dabei angestellten Beobachtungen für den Zivilschutz nicht verwendbar.

2.50 Bei einer atomaren Unterwasserexplosion bildet sich ein Feuerball, der aber wahrscheinlich kleiner ist als bei einer Luftexplosion. Bei dem *Baker*-Versuch wurde das Wasser in der Umgebung der Explosion durch die Leuchtkraft des Feuerballes erhellt. Die durch die natürlichen Wellen auf der Oberfläche der Lagune verursachten Unebenheiten behinderten eine klare Sicht des Feuerballes, und die Gesamtwirkung war so ähnlich, als ob man Licht durch eine Projektionsmattscheibe sieht. Die Helligkeit hielt einige Millisekunden an, sie verschwand aber, sobald die Blasen der den Feuerball bildenden heißen Hochdruckgase den Wasserspiegel erreichten. Zu dieser Zeit waren die Gase verdrängt und abgekühlt, so daß der Feuerball nicht mehr sichtbar war.

2.51 Bei ihrer raschen Ausdehnung verursachen die noch unter Wasser befindlichen Gasblasen eine Stoßwelle. Die Spur dieser sich von der Explosion nach außen ausbreitenden Welle ist bei einigermaßen ruhigem Wasserspiegel als rasch anwachsender Kreis wahrzunehmen, der weißer als das umgebende Wasser aussieht. Diese Erscheinung, die manchmal auch »Gischt« genannt wird, hebt sich bei ruhigem Wasser deutlich ab, weil an der Oberfläche des Wassers kleine Wassertropfen ein wenig in die Luft geschleudert werden, und die dabei mitgeführte Luft läßt die von der Stoßwelle betroffene Oberfläche des Wassers weiß erscheinen.

2.52 Unmittelbar nach dem Auftreten des »Gischts« und noch vor Bildung der Wilsonschen Wolke wird eine Fontäne oder eine Säule von Sprühwasser, der sog. »Sprühdom«, über dem Explosionspunkt aufgeworfen (s. Bild 2.52). Dies ist eine Folgeerscheinung der Reflexion der Stoßwelle auf der Oberfläche. Die anfängliche Aufwärtsgeschwindigkeit des Wassers ist proportional dem Druck der direkten Stoßwelle, und deshalb ist sie unmittelbar über dem Explosionspunkt am größten. Infolgedessen steigt das Wasser in der Mitte rascher (und längere Zeit) als das weiter entfernte Wasser. Dadurch werden die Seiten des »Sprühdomes« mit zunehmendem Hochsteigen des Wassers steiler. Die Aufwärtsbewegung wird durch die Anziehungskraft der Erde und den Luftwiderstand beendet. Die gesamte Zeit des Emporsteigens und die erreichte maximale Höhe sind abhängig vom Explosionswert und von der Explosionstiefe unter der Wasseroberfläche. Bei sehr tiefer Unterwasserexplosion kann der Sprühdom evtl. überhaupt nicht sichtbar sein.

2.53 Wenn die Explosionstiefe nicht zu groß ist, bleibt die Blase heißen komprimierten Gases im wesentlichen intakt, bis sie an die Wasseroberfläche steigt. Hier werden die Gase, die etwas flüssiges Wasser mitführen, in die Atmosphäre verdrängt. Ein Teil der Stoßwelle gelangt durch die Wasseroberfläche in die Luft, und wegen der hohen Feuchtigkeit sind die Voraussetzungen für die Bildung einer Kondensationswolke gegeben (s. Bild 2.53a). Mit nachlassendem Druck der Blase läuft Wasser in den Hohlraum, und die sich ergebenden Erscheinungen bewirken, daß das Wasser als Hohlzylinder oder Sprühkamin (sog. »Säule«) aufgeworfen wird. Der radioaktive Inhalt der Gasblase wird durch diese hohle Säule frei und bildet in ihrem oberen Teil eine blumenkohlförmige Wolke (s. Bild 2.53b).

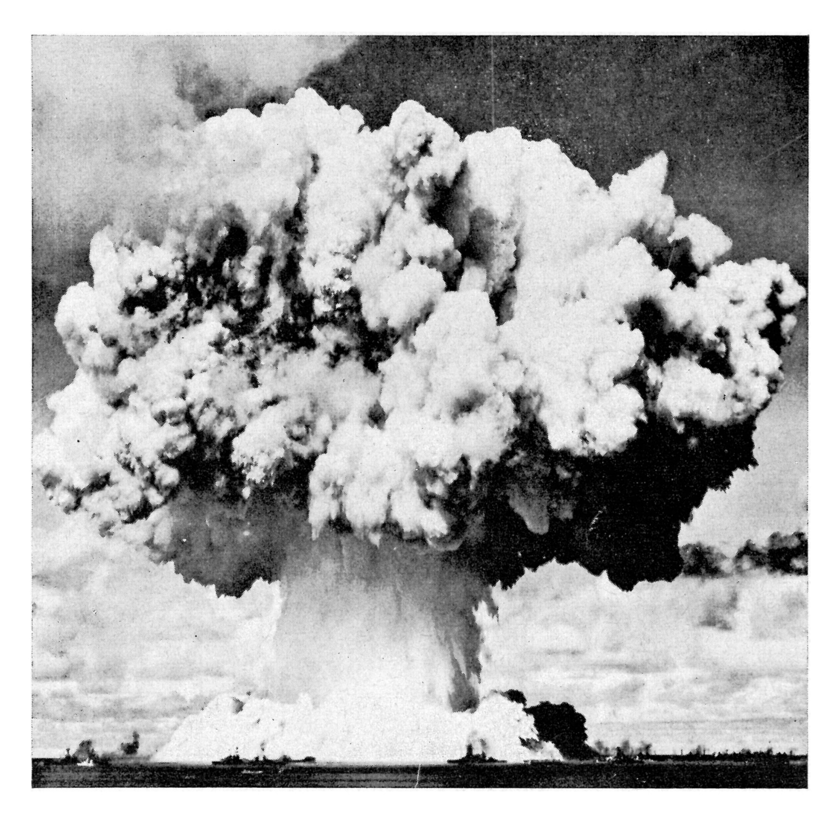


Bild 2.54 Die radioaktive Wolke und die ersten Phasen der »Bodenwalze« nach einer Unterwasserexplosion. Das Wasser beginnt jetzt, von der Säule in die Lagune zurückzufallen.

2.54 Bei der in nicht sehr großer Tiefe durchgeführten Unterwasserexplosion auf Bikini *(Baker)* begann der Sprühdom sich 4 Millisekunden nach der Explosion zu bilden. Seine anfängliche Aufstiegsgeschwindigkeit betrug rund 760 m/sec, sie ließ jedoch infolge des Luftwiderstandes und der Schwerkraft sehr rasch nach. Einige Millisekunden später erreichte die heiße Gasblase die Oberfläche der Lagune, und es bildete sich die Säule, die den Sprühdom rasch überholte. Die maximale Höhe der Hohlsäule, durch welche die Gase entwichen, konnte nicht genau geschätzt werden, da der obere Teil von der Atomwolke umgeben war (s. Bild 2.54). Die Säule war wahrscheinlich 1800 m hoch, und der maximale Durchmesser betrug etwa 610 m. Die Wandungen waren wahrscheinlich 90 m dick, und es wurden etwa 1 Million t Wasser in der Säule emporgeschleudert.

2.55 Die blumenkohlförmige Wolke, die den oberen Teil der Säule verdeckte, enthielt einige der Spaltungsprodukte und andere Sprengkörperrückstände sowie eine große Menge Wasser in Form kleiner Tropfen. Außerdem hat es sich gezeigt, daß

vom Grunde der Lagune hochgesogene Stoffe ebenfalls darin vorhanden waren, denn es wurden kalkhaltige (oder kreidehaltige) Ablagerungen, die aus der Atomwolke gefallen sein mußten, auf dem Deck der in einiger Entfernung von der Explosion befindlichen Schiffe gefunden. Die Wolke hatte einen Durchmesser von rund 1800 m und stieg, bevor sie sich auflöste, bis zu einer Höhe von fast 3000 m, also bei weitem nicht so hoch wie die Atomwolke bei einer Luftexplosion.

2.56 Durch die Unterwasserexplosion wurde eine Reihe von Wellen hervorgerufen, die sich vom Explosionszentrum nach außen über die Oberfläche der Bikini-Lagune ausdehnten. 11 Sekunden nach der Explosion hatte die erste Welle eine maximale Höhe von etwa 28 m und lag etwa 300 m vom Nullpunkt entfernt. Diese Welle bewegte sich mit großer Geschwindigkeit nach außen, und es folgte eine Reihe weiterer Wellen. Bei 6700 m vom Nullpunkt war die 9. Welle mit einer Höhe von 1,85 m die höchste der Wellenreihe.

Die Bodenwalze

2.57 Beim Zurückfallen der Wasser- und Sprühsäule in die Lagune entwickelte sich bei dem *Baker*-Versuch eine riesige Nebelwelle (oder -wolke), die den unteren Teil der Säule völlig verdeckte (s. Bild 2.54). Diese wulstförmige Wolke, die sich von

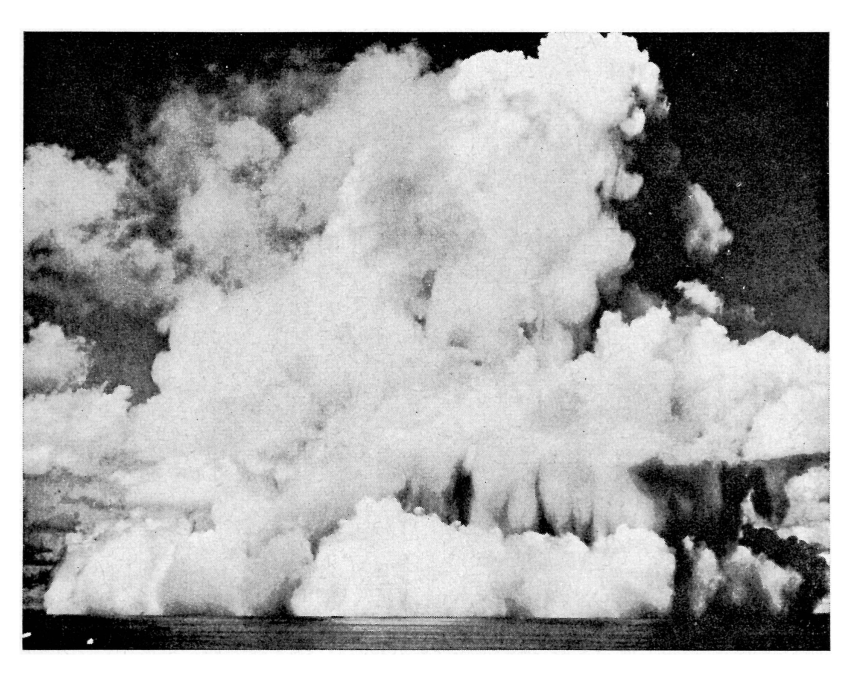


Bild 2.58 Entwicklung der Bodenwalze nach einer Unterwasserexplosion

der Säule hinweg rasch nach außen fortpflanzte, nennt man die Bodenwalze. Es ist dies im wesentlichen eine dichte Wolke aus Wassertröpfchen, sehr ähnlich dem Wasserstaub am Fuße der Niagarafälle (oder anderer hoher Wasserfälle), jedoch mit der besonderen Eigenschaft, fast so zu fließen wie eine homogene Flüssigkeit.

2.58 Die Bodenwalze auf Bikini begann sich 10 oder 12 Sekunden nach der Explosion zu bilden. Die Wolke der Bodenwalze, die nach oben anschwoll, erreichte rasch eine Höhe von 275 m und breitete sich mit einer Anfangsgeschwindigkeit von mehr als 1,5 km/min nach außen aus. Innerhalb von 4 Minuten betrug der äußere Radius der Wolke, die zuerst rasch und dann langsamer anwuchs, fast 5,5 km, und ihre Höhe war auf 550 m angewachsen. Dann hob sich die Bodenwalze allmählich von der Oberfläche des Wassers ab und begann, mit der Atomwolke und anderen Wolken am Himmel zu verschmelzen (s. Bild 2.58).

2.59 Nach etwa 5 Minuten sah die Bodenwalze aus wie eine Masse von geschichteten Haufenwolken, die schließlich eine Dicke von über 1000 m erreichte (s. Bild 2.59). Ein mittelmäßiger bis starker Regen, der sich mit dem Winde bewegte und nahezu eine Stunde dauerte, entwickelte sich aus der Wolkenmasse. In seinen ersten Phasen wurde der Regen noch durch die kleinen Wassertropfen verstärkt, die immer noch aus der Atomwolke niederfielen.

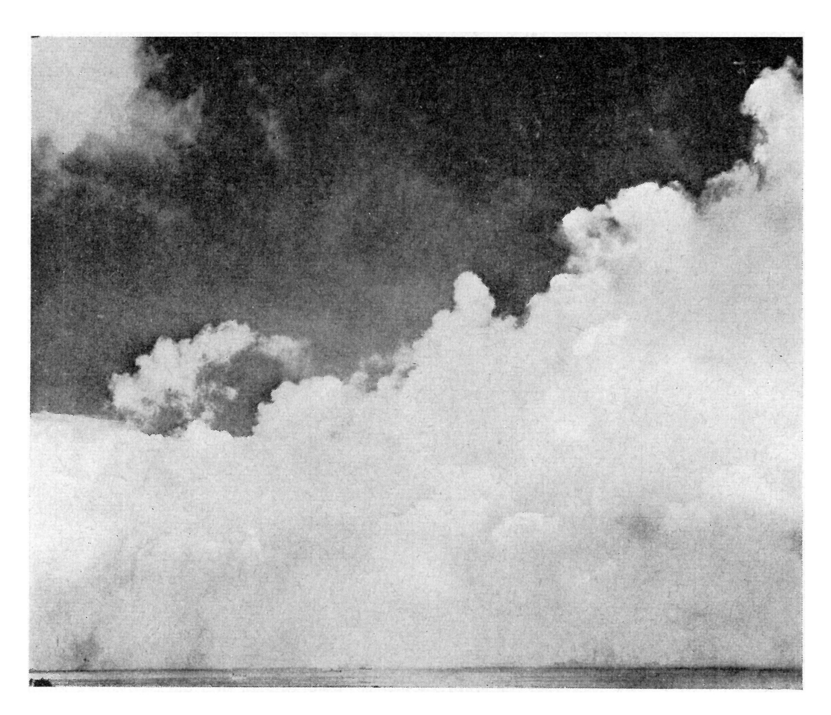


Bild 2.59 Endphase der Entwicklung der Bodenwalze

2.60 In bezug auf die Waffenwirkungen liegt die Bedeutung der Bodenwalze in der Tatsache, daß sie wahrscheinlich durch die Spaltungsprodukte, die entweder beim Entstehen der Bodenwalze darin vorhanden waren oder aus der Atomwolke in sie hineinfielen, stark radioaktiv ist. Wegen ihrer Radioaktivität kann sie auf eine Entfernung von mehreren Kilometern eine ernsthafte Gefahr darstellen, insbesondere in Mitwindrichtung (s. Kap. IX). Jedes Objekt, über das die Bodenwalze hinweggeht, wird wahrscheinlich verstrahlt durch den Niederschlag von Wassertropfen, denen Spaltungsprodukte anhaften können. Die Bodenwalze und der Niederschlag oder das »Ausregnen« aus der Atomwolke bilden die Quelle der Rückstandsstrahlung nach einer Unterwasser-Kernexplosion.

2.61 Die notwendigen Voraussetzungen für die Bildung einer Bodenwalze sind nicht endgültig festgelegt worden; jedoch wird die Bodenwalze auftreten, wenn sich eine Säule von nennenswerter Größe bildet. Die Wahrscheinlichkeit, daß dies eintritt, steigt mit der Zunahme der Explosionstiefe bis zu ziemlich großen Tiefen.

2.62 Bei einer ausreichend tief erfolgenden Unterwasser-Kernexplosion verliert die heiße Gasblase ihre charakteristischen Merkmale, bevor sie die Wasseroberfläche erreicht. Dann entsteht keine hohe Wasser- und Sprühsäule und auch nur eine geringe oder gar keine Bodenwalze. Die Auflösung der Gasblase in eine große Anzahl kleiner Blasen, die vom Wasser durchsetzt sind, erzeugt einen radioaktiven Schaum. Wenn dieser die Wasseroberfläche erreicht, bildet sich eine geringe Menge Nebel, aber der größte Teil der Radioaktivität verbleibt im Wasser. Dadurch entsteht bei einer tiefen Unterwasserexplosion keine Atomwolke und auch kein größerer radioaktiver Niederschlag. Die Ablagerung des stark radioaktiven Schaumes kann jedoch am naheliegenden Ufer eine Gefahr darstellen.

Thermische und Kernstrahlen

2.63 Im wesentlichen wird die gesamte thermische Strahlung, die von dem Feuerball ausgesandt wird, solange er sich noch unter Wasser befindet, von dem umgebenden Wasser absorbiert. Wenn die heißen Gase die Wasseroberfläche erreichen und sich ausdehnen, erfolgt die Abkühlung so schnell, daß die Temperatur fast unmittelbar so weit absinkt, daß nennenswerte thermische Strahlen nicht mehr ausgesandt werden. Daraus folgt, daß bei einer Unterwasser-Kernexplosion die thermische Strahlung unbeachtet bleiben kann, soweit ihre Wirkung auf Personen und als Brandursache in Frage kommt.

2.64 Es ist auch wahrscheinlich, daß der größte Teil der innerhalb einer kurzen Zeit nach dem Einsetzen der Explosion freiwerdenden Neutronen und Gammastrahlen ebenfalls vom Wasser absorbiert wird. Wenn jedoch der Feuerball die Wasseroberfläche erreicht und die Gase verdrängt werden, stellen die Gammastrahlen (und die Betateilchen) aus den Spaltungsprodukten eine Art Anfangsstrahlung dar. Außerdem tragen die Strahlen aus den Spaltungsprodukten (und den induzierten radioaktiven Produkten), die in der Säule, der Atomwolke und der Bodenwalze ent-

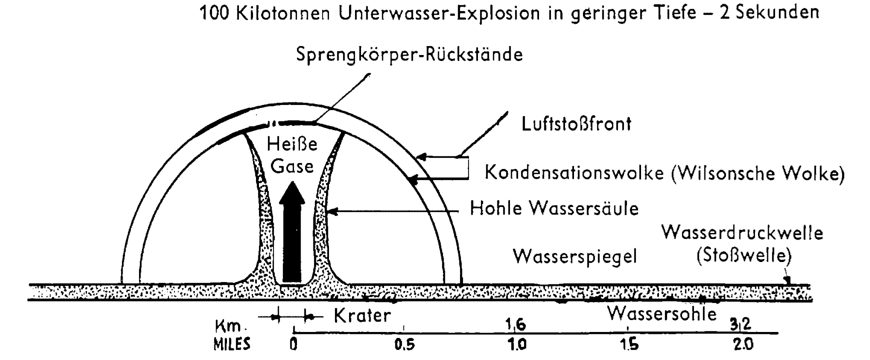


Bild 2.66a Chronologische Entwicklung der Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe unter Wasser: 2 Sekunden nach der Explosion

halten sind (welche sich sämtlich innerhalb weniger Sekunden nach der Explosion bilden), zu der Anfangsstrahlung bei.

2.65 Jedoch sind auch der Wasserniederschlag (oder das »Ausregnen«) aus der Wolke und die Bodenwalze für die oben erwähnte Rückstandsstrahlung verantwortlich. Bei einer Unterwasserexplosion ist es also weniger von Bedeutung, einen scharfen Unterschied zwischen der Anfangsstrahlung und der Rückstandsstrahlung zu machen, als z. B. bei einer Luftexplosion. Die Anfangsstrahlung vermischt sich laufend mit den Strahlen, die eine Zeitlang nach der Kernexplosion erzeugt werden.

Chronologische Entwicklung einer in nicht sehr großer Tiefe erfolgenden Unterwasserexplosion

2.66 Die Zeichnungen in Bild 2.66a bis 2.66e geben einen schematischen Überblick über die chronologische Entwicklung der Erscheinungen, die mit einer in nicht sehr großer Tiefe erfolgenden Unterwasserexplosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers verbunden sind. Die Angaben stellen eine Ergänzung der oben gemachten Angaben über die Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers dar. Im wesentlichen sind alle Wirkungen – außer der Stoßfront und den Kernstrahlen – mit dem Auge sichtbar.

Wenn ein Atomsprengkörper unter der Wasseroberfläche explodiert, bildet sich eine Blase außerordentlich heißer Gase, die die Wasseroberfläche durchbricht, wenn die Explosion in geringer Tiefe erfolgt. Dadurch wird eine hohle Wasser- und Gischtsäule emporgeschleudert, die innerhalb von 2 Sekunden nach Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers eine Höhe von über 1500 m erreicht. Die gasförmigen Sprengkörperreste entweichen dann durch den hohlen Mittelteil der Wassersäule.

Die durch die Explosion im Wasser erzeugte Stoß-(oder Druck-)Welle breitet sich mit hoher Geschwindigkeit nach außen aus, so daß sie sich nach 2 Sekunden über

mehr als 3 km vom Nullpunkt erstreckt. Die Ausdehnung der heißen Gasblase führt ebenfalls zur Bildung einer Stoß-(oder Druck-)Welle in der Luft, aber diese bewegt sich weniger schnell als die Stoßwelle im Wasser, so daß ihre Front etwa 1,5 km vom Nullpunkt entfernt ist.

Bald nachdem die Luftstoßwelle vorüber ist, bildet sich 1 oder 2 Sekunden lang eine halbkugelförmige Wolke kondensierter Wassertröpfchen, die sog. Kondensationswolke. Obwohl diese Erscheinung wissenschaftlich interessant ist, hat sie offenbar keine Bedeutung für einen Angriff mit Kernwaffen oder die Verteidigung.

Bei einer Explosion in mittlerer (oder großer) Tiefe unter Wasser werden im wesentlichen die gesamte thermische Strahlung und ein großer Teil der Anfangsstrahlung durch das Wasser absorbiert.

12 Sekunden nach der Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers beträgt der Durchmesser der Wassersäule etwa 1000 m, und ihre Wandungen sind etwa 155 m dick. Die durch den hohlen Mittelteil der Säule entweichenden Sprengkörperreste werden kondensiert und verstreut, so daß sie eine blumenkohlförmige Atomwolke bilden, die teilweise den oberen Teil der Säule verdeckt. Die Wolke ist auf Grund der darin vorhandenen Spaltungsprodukte stark radioaktiv, und sie sendet deshalb Kernstrahlen aus. Wegen der Höhe der Wolke sind diese Strahlen nur eine geringe Gefahr für Personen in der Nähe der Wasseroberfläche.

10 bis 12 Sekunden nach der Explosion in geringer Tiefe unter Wasser erreicht das aus der Säule zurückfallende Wasser die Oberfläche und erzeugt rund um den unteren Teil der Säule einen Ring stark radioaktiven Nebels, die sog. Bodenwalze. Diese ringförmige Wolke bewegt sich nach außen parallel zur Wasseroberfläche mit großer Geschwindigkeit von anfangs 60 m/sec oder 215 km/h.

100 Kilotonnen Unterwasser-Explosion in geringer Tiefe – 12 Sek.

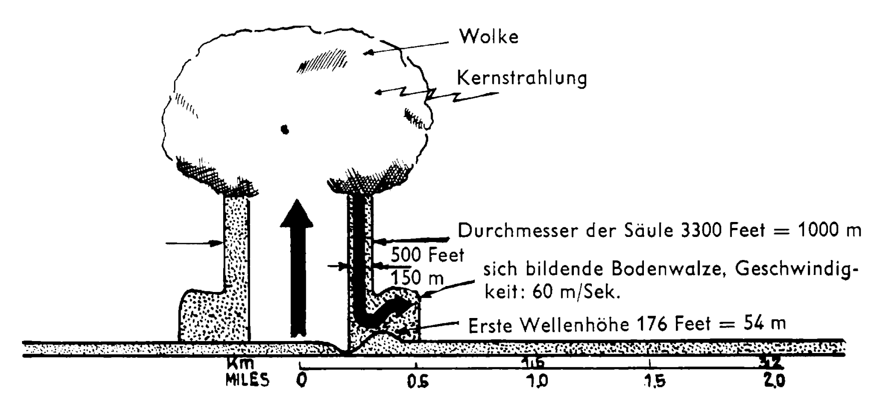


Bild 2.66 b *Chronologische Entwicklung der Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe unter Wasser: 12 Sekunden nach der Explosion*

Die durch die Unterwasserexplosion entstehende Störung verursacht große Wellen auf der Wasseroberfläche. 12 Sekunden nach Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers liegt die erste Welle bei etwa 550 m vom Nullpunkt, und ihre Höhe von der Wellenkrone bis zum Wellental beträgt etwa 55 m.

Wenn das Wasser und der Gischt, die die Säule bilden, weiter herabfallen, entwickelt sich die Wolke der Bodenwalze, die nach oben anschwillt und sich über die Wasseroberfläche nach außen ausbreitet. 20 Sekunden nach Explosion des 100-kt-Atomsprengkörpers beträgt die Höhe der Bodenwalze etwa 300 m, und ihre Front liegt fast 800 m vom Nullpunkt. Sie breitet sich dann mit einer Geschwindigkeit von etwa 45 m/sec nach außen aus.

Ungefähr zu diesem Zeitpunkt beginnen große Wassermengen, manchmal auch als »massiver Wasserniederschlag« bezeichnet, aus der Atomwolke herabzufallen. Die Anfangsgeschwindigkeit dieses Niederschlags beträgt etwa 15 m/sec. Wegen des Wasserverlustes aus der Säule hat sich deren Durchmesser jetzt auf etwa 600 m verringert.

Nach 20 Sekunden hat die erste Wasserwelle etwa 600 m vom Nullpunkt erreicht, und ihre Höhe beträgt dann etwa 30 m.

1 Minute nach der Unterwasserexplosion erreicht das aus der Atomwolke fallende Wasser die Wasseroberfläche und bildet eine Zone primären Wolkenniederschlags. Dadurch ergibt sich zwischen der Wolke und der Wasseroberfläche ein ununterbrochener Ring von Wasser und Gischt.

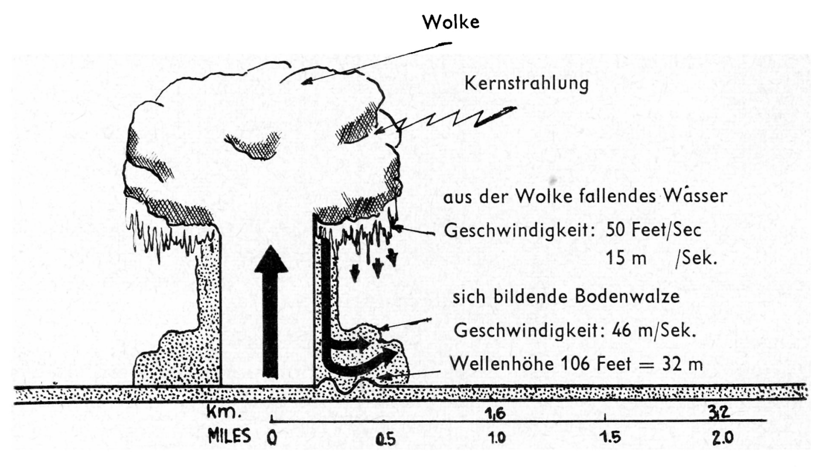


Bild 2.66c Chronologische Entwicklung der Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe unter Wasser: 20 Sekunden nach der Explosion

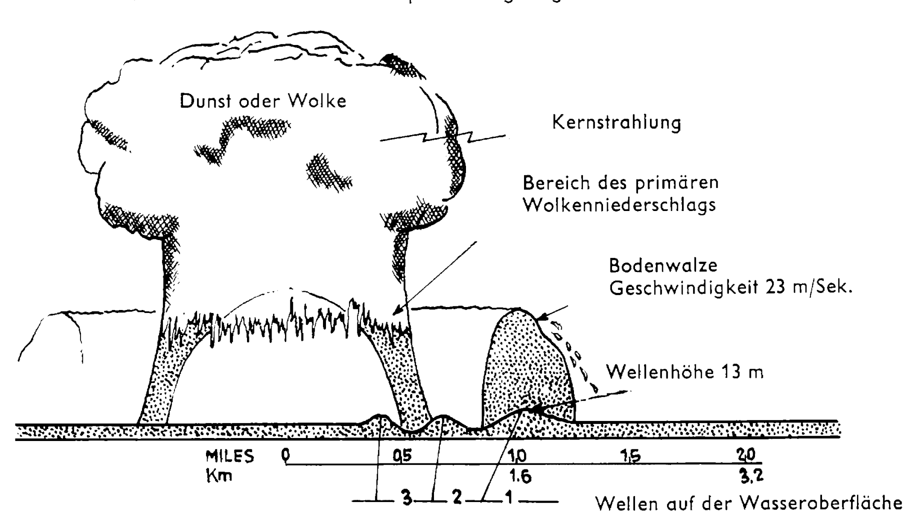


Bild 2.66d Chronologische Entwicklung der Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe unter Wasser: 1 Minute nach der Explosion

Ungefähr zu diesem Zeitpunkt hat sich die Bodenwalze vom Boden der Säule abgesondert, so daß ihre ringähnliche Form offenbar wird. Die Höhe der Bodenwalze beträgt jetzt 400 m, und ihre Front, die sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 23 m/sec nach außen ausbreitet, liegt etwa 2 km vom Nullpunkt. Wegen der Radioaktivität der Wassertröpfchen, die die Bodenwalze bilden, stellt letztere eine Gefahr für Personen dar.

Mehrere Wasserwellen haben sich jetzt entwickelt, von denen die erste bei einer Höhe von 13 m etwa 1,5 km vom Nullpunkt entfernt ist.

$2^1/_2$ Minuten nach der Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers unter Wasser ist die Front der Bodenwalze etwa 3 km vom Nullpunkt entfernt und rund 600 m hoch. Die größte Entfernung der Bodenwalze, die innerhalb von 4 Minuten erreicht wird, beträgt etwa 4 km vom Nullpunkt, d. i. ein Durchmesser von 8 km. Die Bodenwalze scheint jetzt von der Wasseroberfläche aufzusteigen. Dies beruht auf mehreren Faktoren, einschließlich einer tatsächlichen Zunahme an Höhe, Verdünnung der Wolke durch einströmende Luft und Ausregnen der größeren Wassertropfen. Durch den natürlichen radioaktiven Zerfall der Spaltungsprodukte, durch das Ausregnen und die Verdünnung des Nebels durch die Luft beträgt die Intensität der Kernstrahlung aus der Bodenwalze 2,5 Minuten nach der Explosion nur $^1/_{20}$ der eine Minute nach der Explosion vorhandenen Strahlung.

Der Niederschlag von Wasser und Gischt aus der Säule und durch die Kondensation der Atomwolke bildet eine zusammenhängende Nebel- oder Wolkenmasse

bis hinunter zur Wasseroberfläche und vermischt sich hier mit der Bodenwalze, die sich ausgedehnt und an Höhe zugenommen hat, sowie mit den natürlichen Wolken des Himmels, um endlich vom Wind auseinandergetrieben zu werden.

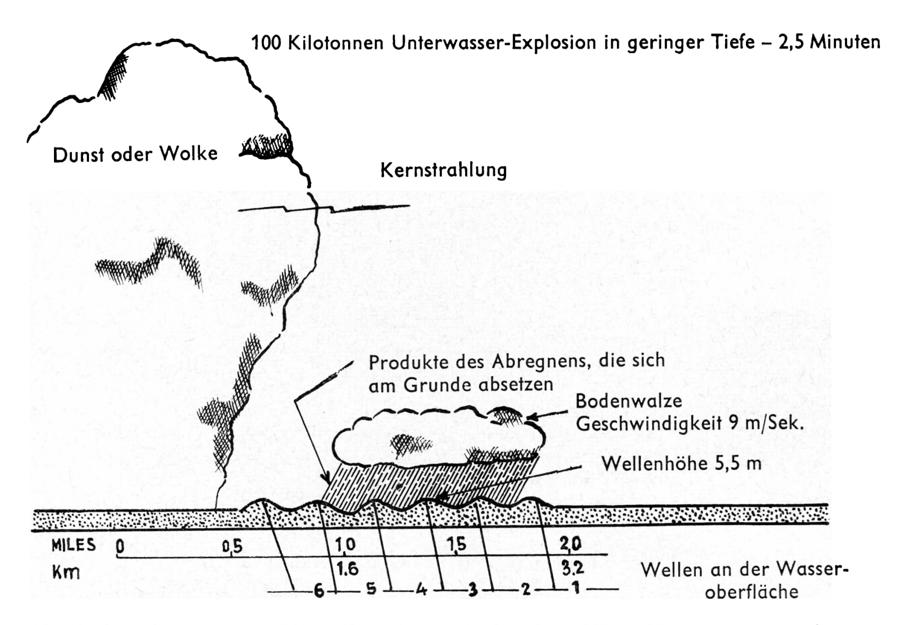


Bild 2.66e Chronologische Entwicklung der Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe unter Wasser: 2,5 Minuten nach der Explosion

Beschreibung einer Untererdexplosion

Die auftretenden Erscheinungen

2.67 Wenn ein Atomsprengkörper unter der Erde explodiert, bildet sich ein Feuerball, der aus ungeheuer heißen Gasen von hohem Druck besteht und verdampfte Erde und Sprengkörperrückstände enthält. Erfolgt die Explosion in nicht zu großer Tiefe, so kann man den Feuerball sehen, wie er die Erdoberfläche durchbricht, bevor er durch Wolken von Staub und Schutt verdunkelt wird. Wenn die Gase frei werden, tragen sie große Mengen Erde, Gestein und Schutt in Form einer zylindrischen Säule mit sich in die Luft, ähnlich wie bei einer Unterwasserexplosion. Bei der im Jahre 1951 in Nevada durchgeführten Versuchsexplosion in geringer Tiefe unter der Erde nahm die Säule die Form eines umgekehrten Kegels an, der sich beim Aufsteigen

strahlenförmig ausbreitete (Bild 2.67). Durch die große Menge von Materie, die durch die Explosion aufgeworfen wurde, entstand ein Krater von beträchtlicher Größe im Erdboden.

2.68 Nach den in Nevada durchgeführten Versuchen schätzt man, daß, wenn ein 1-Megatonnen-Atomsprengkörper aus der Luft abgeworfen wird und vor dem Explodieren den Untergrund in sandigem Boden bis zu einer Tiefe von 15 m durchschlägt, der entstehende Krater etwa 60 m tief und fast 425 m im Durchmesser sein würde. Das bedeutet, daß ungefähr 10 Millionen t Erde und Gestein von der Erdoberfläche hochgeschleudert würden. Das Volumen des Kraters und die Masse der durch die Explosionskraft aufgeworfenen Materie nimmt ungefähr proportional zum Explosionswert des Atomsprengkörpers zu. Die feineren Teilchen können bei ihrem Niederfallen zur Erde eine Bodenwalze verursachen, die bereits an anderer Stelle beschrieben ist.

2.69 Die rasche Ausdehnung der bei der Untererdexplosion entstandenen heißen Hochdruckgasblase verursacht eine Erdstoßwelle, deren Wirkungen etwa ähnlich sind wie die eines Erdbebens mittlerer Stärke, nur daß das Zentrum ziemlich nahe an der Erdoberfläche anstatt in großer Tiefe liegt. Der Unterschied in der Ent-

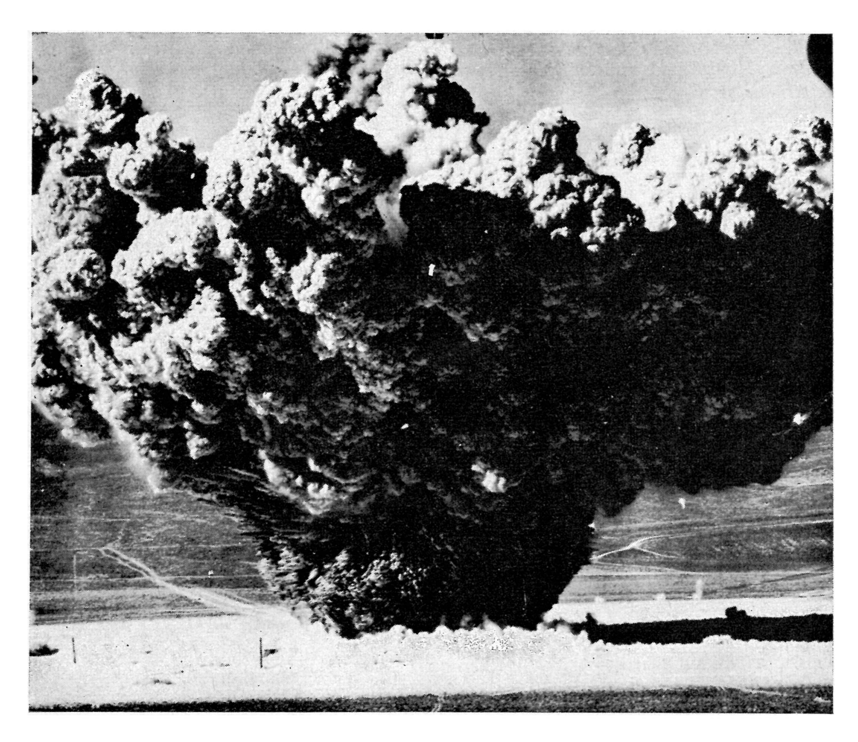


Bild 2.67 Untererdexplosion in geringer Tiefe

stehungstiefe bedeutet, daß der durch einen Atomsprengkörper verursachte Druck der Erdstoßwelle mit zunehmender Entfernung rascher nachläßt als der Druck von Erdbebenwellen. Ferner sind die Energie einer Kernexplosion und die Dauer der Stoßwelle geringer als bei einem Erdbeben.

2.70 Wie bei einer Unterwasserexplosion tritt ein Teil der durch den Atomsprengkörper bei einer Untererdexplosion freiwerdenden Energie als Druckwelle in der Luft in Erscheinung. Wieviel Energie in Form eines Luftstoßes an die Luft abgegeben wird, hängt hauptsächlich von der Tiefe der Explosion ab. Je größer die Eindringtiefe des Atomsprengkörpers vor ihrer Explosion, um so geringer der Teil der Stoßwelle, der in die Luft entweicht.

Bodenwalze und radioaktiver Niederschlag

2.71 Wenn die bei einer Untererdexplosion als Staubsäule aufgeworfene Materie zur Erde zurückfällt, verursacht sie in vielen Fällen eine sich ausbreitende Wolke feiner Erdteilchen ähnlich der in dem *Baker*-Versuch von Bikini beobachteten Bodenwalze. Wir können z. B. in Bild 2.71 die ersten Phasen einer Bodenwalze sehen, die dem Bild 2.58 in vielen Punkten ähnlich ist. Die Bodenwalze aus Staubteilchen bewegt sich vom Explosionszentrum nach außen und wird danach in Mitwindrichtung weitergetragen. Schließlich werden die Teilchen ausgeschieden und verursachen eine radioaktive Verstrahlung über einen großen Raum, dessen Ausmaß

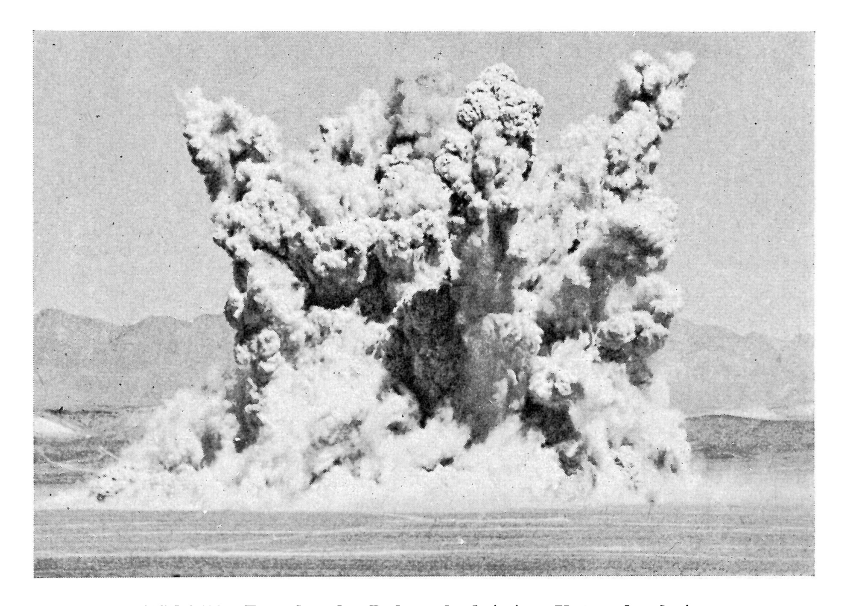


Bild 2.71 Entstehen der Bodenwalze bei einer Untererdexplosion

von der Explosionstiefe, der Bodenart und den atmosphärischen Verhältnissen sowie vom Explosionswert des Atomsprengkörpers abhängt. Es wird angenommen, daß trockener Sandboden bei einer Untererdexplosion für die Bildung einer Bodenwalze besonders geeignet ist.

2.72 Die bei einer Untererdexplosion entstehende Atomwolke enthält auf jeden Fall eine große Menge Erde, Gestein und eine Vielfalt von Schutt. Deshalb ist der Niederschlag strahlender Materie beträchtlich. Die bei der Explosion aufgeworfenen größeren Teilchen erreichen als erste die Erde, deshalb werden sie in der Nähe des Explosionspunktes niedergehen. Aber die kleineren Teilchen verbleiben noch einige Zeit schwebend in der Luft und können durch den Wind über große Entfernungen getragen werden, bevor sie schließlich niederfallen.

Thermische und Kernstrahlen

2.73 Die Verhältnisse sind bei der thermischen und Kernstrahlung aus einer Untererdexplosion ganz ähnlich wie bei einer Unterwasserexplosion. Im allgemeinen wird die thermische Strahlung fast völlig durch den Erdboden absorbiert, so daß sie keine bedeutsame Gefahr darstellt. Der größte Teil der Neutronen und Gammastrahlen der Anfangsstrahlung wird ebenfalls beseitigt, obwohl das Einfangen der Neutronen eine beträchtliche Menge induzierter Radioaktivität in verschiedenen der im Erdboden vorhandenen Stoffe verursachen kann. Dies bildet einen kleinen Teil der nuklearen Rückstandsstrahlung, die nur in großer Nähe des Explosionspunktes von Bedeutung ist. Die übrige Rückstandsstrahlung wird durch die verstrahlte Bodenwalze und den radioaktiven Niederschlag verursacht.

2.74 Aus den gleichen Gründen wie den in Abschn. 2.64 für eine Unterwasserexplosion angeführten neigen die Anfangs- und die Rückstandsstrahlung aus einer Untererdexplosion dazu, sich miteinander zu vermischen. Der Unterschied zwischen beiden Strahlungsarten hat deshalb im Vergleich zu einer Luftexplosion bei einer Untererdexplosion wenig zu bedeuten.

Chronologische Entwicklung einer Untererdexplosion in geringer Tiefe

2.75 Die chronologische Entwicklung einiger der mit einer Kernexplosion von 100 kt in geringer Tiefe unter der Erde verbundenen Erscheinungen ist in Bild 2.75a bis 2.75d dargestellt.

Wenn eine Kernexplosion in geringer Tiefe unter der Erde erfolgt, so durchbricht innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde nach der Explosion der Feuerball die Erdoberfläche. Dabei werden die ungeheuer heißen Gase unter hohem Druck freigemacht, und diese tragen große Mengen Erde, Gestein und Schutt in Form einer hohlen Säule mit sich in die Luft. Bei einer Explosion in geringer Tiefe nimmt die Säule etwa die Form eines umgekehrten Kegels an, der sich beim Aufsteigen fächerartig ausbreitet



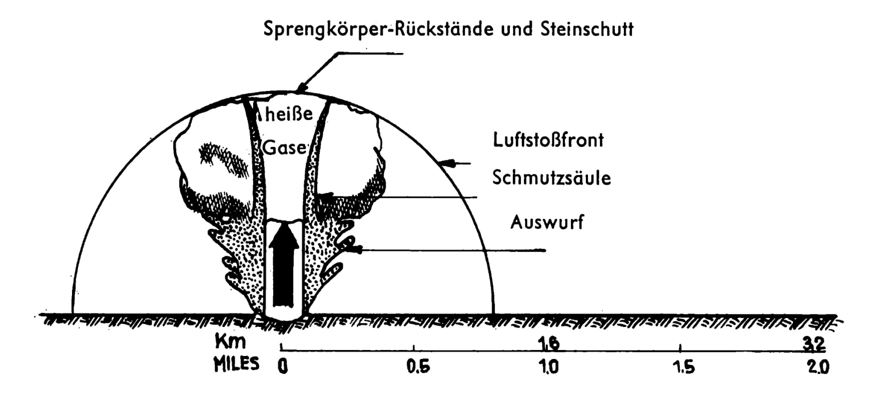


Bild 2.75a *Chronologische Entwicklung der Untererdexplosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe: 2,0 Sekunden nach der Explosion*

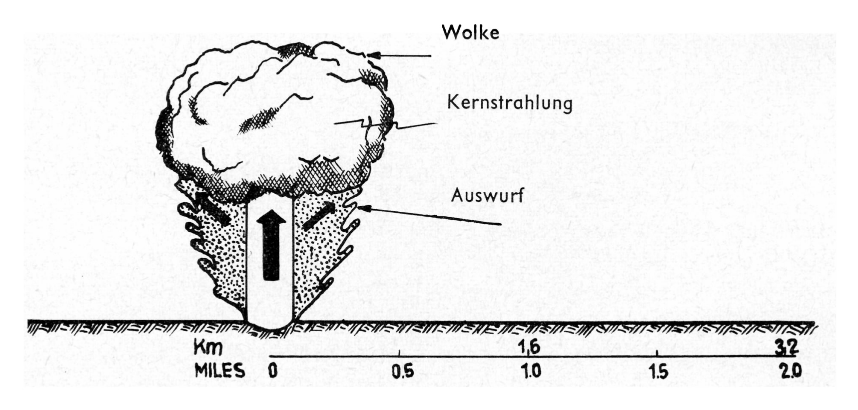


Bild 2.75b *Chronologische Entwicklung der Untererdexplosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe: 9 Sekunden nach der Explosion*

und dabei einen strahlenförmigen Auswurf verursacht. Eine stark radioaktive Wolke, die große Mengen Erde enthält, bildet sich über dem Auswurf beim Abkühlen und Kondensieren der heißen Dämpfe. Durch die Verdrängung von Materie von der Erdoberfläche bildet sich ein Krater. Bei einem 100-kt-Atomsprengkörper, der etwa 15 m unter der Oberfläche in trockenem Boden explodiert, würde der Krater eine Tiefe von etwa 36 m und einen Durchmesser von etwa 220 m haben. Das Gewicht der verdrängten Materie würde über eine Million Tonnen betragen.

Außer der Erdstoß-(oder Druck-)Welle, die etwa einer Erdbebenwelle ähnlich ist, wird die Explosion von einer Stoß-(oder Druck-)Welle in der Luft begleitet. 2 Sekunden nach der Explosion ist die Stoßfront in der Luft etwa 1200 m vom Nullpunkt entfernt.

Die Atomwolke steigt weiter, wobei sie starke Kernstrahlen abgibt, die 9 Sekunden nach der Explosion am Erdboden noch eine Gefahr darstellen. Zu diesem Zeitpunkt beginnen die größeren Gesteins- und Schutteile in dem Auswurf zur Erde herabzufallen.

Wenn die Materie aus der Säule herniederfällt, erreichen die feineren Erdteilchen eine hohe Geschwindigkeit. Beim Erreichen des Erdbodens breiten sie sich rasch aus und bilden eine Bodenwalze ähnlich wie bei einer Unterwasserexplosion. Das Ausmaß der Bodenwalze, die wahrscheinlich radioaktiv ist, hängt von vielen Faktoren ab einschließlich des Explosionswertes, der Explosionstiefe und der Bodenart. Es wird angenommen, daß trockener, sandiger Boden für die Bildung der Bodenwalze besonders geeignet ist.

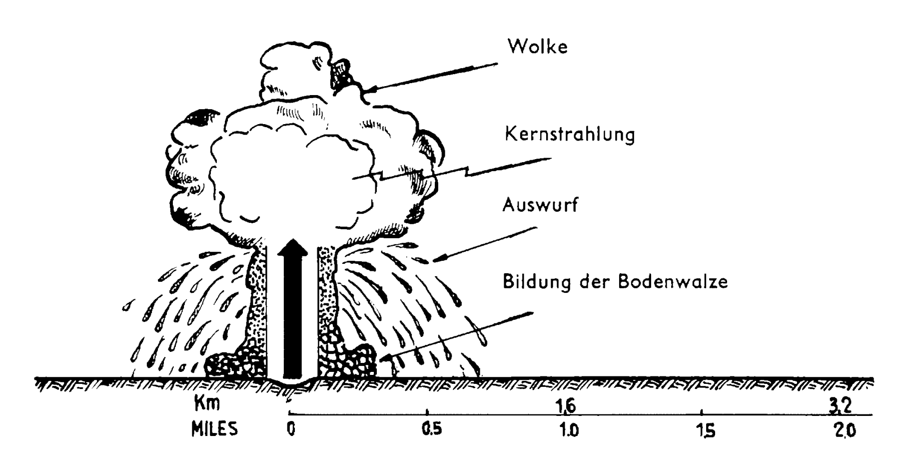


Bild 2.75c Chronologische Entwicklung der Untererdexplosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe: 45 Sekunden nach der Explosion

Die Bodenwalze nimmt an Höhe und Flächenausdehnung zu und beginnt bald, mit der Atomwolke von Sprengkörperresten zu verschmelzen, von denen ein Teil unter dem Einfluß des Windes herabfällt und verstreut wird. Die radioaktiven Wolken zerstreuen sich dann auch, aber die verstrahlten Teilchen fallen zur Erde nieder und erzeugen über eine große Fläche einige Stunden lang einen gefährlichen radioaktiven Niederschlag, besonders in Mitwindrichtung.

100 Kilotonnen Explosion in geringer Tiefe unter der Erde – 4,5 Minuten

Bild 2.75 d Chronologische Entwicklung der Untererdexplosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe: 4,5 Minuten nach der Explosion

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Kernexplosionserscheinungen[1])

Entwicklung des Feuerballes bei einer Luftexplosion

2.76 Die Temperatur ist in dem ganzen Feuerball in den allerersten Phasen seines Entstehens einheitlich. Die durch die Spaltung (und Verschmelzung) erzeugte Energie kann sich als Strahlung zwischen zwei beliebigen Punkten innerhalb des Bereichs der heißen Gase schnell fortbewegen, und deshalb haben wir kein nennenswertes Temperaturgefälle. Wegen der einheitlichen Temperatur wird das System auch »isothermische Sphäre« genannt, die in dieser Phase mit dem Feuerball identisch ist.

[1]) Die übrigen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

2.77 Wenn, wie vorstehend ausgeführt, der Feuerball anwächst und sich eine Druckwelle in der Luft entwickelt, deckt sich zunächst die Stoßfront mit der Oberfläche der isothermischen Sphäre und dem Feuerball. Wenn jedoch die Temperatur unter etwa 300000° C fällt, dringt die Stoßfront rascher vor als die isothermische Sphäre. Mit anderen Worten: die Energieübertragung durch die Druckwelle ist jetzt schneller als durch Strahlung.

2.78 Da die thermische Strahlung aus »Photonen« besteht, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, ist nicht sofort erkennbar, warum die Energieübertragung durch Strahlung langsamer sein sollte als durch die Luftdruckwelle. Eine vereinfachte Erklärung dieser Erscheinung lautet etwa wie folgt: wegen der hohen Temperatur des Feuerballes konzentriert sich der größte Teil der Strahlung (etwa 70%) in dem ultravioletten Teil des Spektrums, in dem die Wellenlängen weniger als 1860 Å betragen. In der kalten Luft, durch welche die Strahlung geleitet wird, wenn der Feuerball an Größe zunimmt, wird diese Strahlung stark absorbiert, und die mittlere freie Weglänge, d. h. die durchschnittliche Entfernung, die ein Photon zurücklegt, bevor es durch ein Atom oder ein Molekül absorbiert wird, ist sehr gering, etwa in der Größenordnung von höchstens 0,01 cm.

2.79 Im Durchschnitt bewegt sich jedes Photon über eine Entfernung von mittlerer Weglänge mit Lichtgeschwindigkeit. Dann wird es von einem in der Luft enthaltenen Stickstoff- oder Sauerstoffatom, -molekül oder gasförmigen Ion absorbiert, welches dadurch in einen Zustand höherer Energie (oder Anregungszustand) gebracht wird. Die Materie verbleibt eine gewisse Zeit in diesem Zustand und wird danach durch Ausstrahlung eines Photons wieder auf ihren niedrigeren Energiezustand zurückgebracht. Dieses Photon bewegt sich ebenfalls in beliebiger Richtung mit Lichtgeschwindigkeit fort, wird durch ein Atom oder Molekül der Luft eingefangen, worauf eine Wiederausstrahlung folgt usw. Wegen der kurzen freien Weglänge der Strahlen, die eine Wellenlänge von weniger als 1860 Å haben, und auch auf Grund der Tatsache, daß die Photonen sich durch eine aufeinanderfolgende Absorption und Ausstrahlung in zufälliger Richtung bewegen, ist der Gesamtanteil dieses Strahlungstransportes verhältnismäßig gering.

2.80 Zu bemerken ist, daß dieser langsame Transport nur für Strahlung in dem sehr kurzen Wellenlängenbereich des Spektrums gilt. Bei thermischen Strahlen größerer Wellenlänge, d. h. über 1860 Å, deren Menge mit zunehmender Abkühlung der Oberfläche des Feuerballes größer wird, ist die mittlere freie Weglänge viel größer. Deshalb werden diese Strahlen, die in dem nahezu ultravioletten und in dem sichtbaren und infraroten Bereich des Spektrums liegen, vom Feuerball mit Lichtgeschwindigkeit verbreitet.

2.81 Wenn die Stoßfront sich aus der isothermischen Sphäre herausbewegt, verursacht sie eine ungeheure Kompression der vor ihr liegenden Luft. Dadurch wird die Temperatur so weit erhöht, daß die Luft glühend wird. Der Feuerball besteht jetzt aus zwei konzentrischen Bereichen. Der innere (heißere) Bereich ist die isothermische Sphäre von einheitlicher Temperatur; diese wird umgeben von einer Schicht leuchtender, durch den Stoß erhitzter Luft von etwas niedrigerer, jedoch immer noch

sehr hoher Temperatur. Die Trennungsfläche zwischen dem sehr heißen Kern und der etwas kühleren Außenschicht nennt man die »Strahlungsfront«.

2.82 Die vorstehend beschriebenen Erscheinungen sind in Bild 2.82 schematisch dargestellt; links ist auf einer Reihe von Photographien des Feuerballes das qualitative Temperaturgefälle und rechts das Druckgefälle zu verschiedenen Zeiten nach

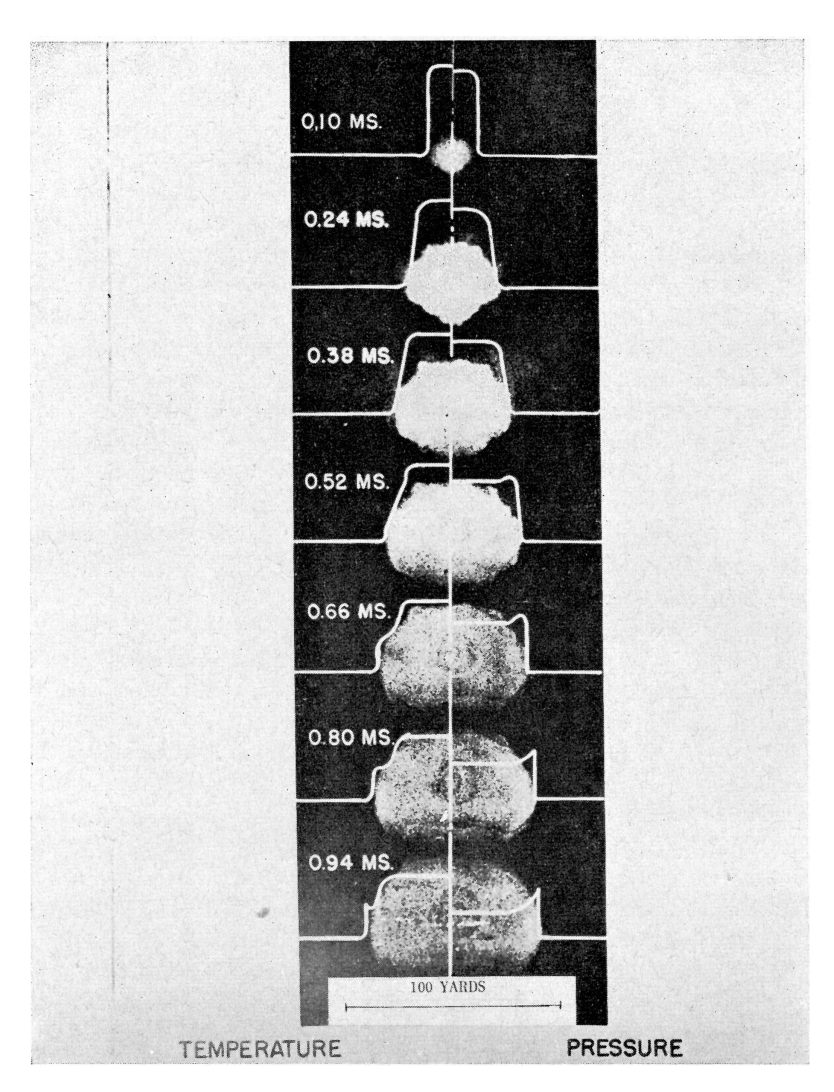


Bild 2.82 Temperatur- und Druckveränderungen in dem Feuerball. (Zeiten und Maße beziehen sich auf einen 20-kt-Atomsprengkörper.)

der Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers gezeigt. Wir sehen, daß auf den ersten 3 Bildern die Temperatur in dem ganzen Feuerball einheitlich ist. Der Feuerball ist hierbei mit der isothermischen Sphäre identisch. Dies zeigt sich an den horizontalen Temperaturlinien innerhalb des Feuerballes und dem scharfen Abfallen der Temperatur an seiner Außenseite. Nach etwa 0,5 Millisekunden bilden sich zwei Temperaturbereiche, wenn sich die Front des Feuerballes, d. h. die Stoßfront, aus der isothermischen Sphäre herausbewegt. Der äußere Bereich des Feuerballes absorbiert die Strahlen und verhindert damit die Sichtbarkeit der isothermischen Sphäre. Die Photographien zeigen deshalb nur die äußere Fläche des Feuerballes.

2.83 Aus der Form der Kurven auf der rechten Seite des Bildes 2.82 ersieht man die Druckveränderungen in dem Feuerball. In den ersten (isothermischen) Phasen ist der Druck überall gleich, jedoch nach 0,5 Millisekunden beginnt die Stoßfront, sich aus der isothermischen Sphäre zu lösen, was an einem etwas höheren Druck in der Nähe der Oberfläche des Feuerballes erkennbar ist. Innerhalb von weniger als einer Millisekunde hat sich die Stoßwelle mit ihrer steilen Front etwas aus dem isothermischen Bereich herausbewegt. Der Druckanstieg in dem Feuerball bis zu einem für eine Stoßwelle charakteristischen Höhepunkt, gefolgt von einem scharfen Druckabfall an der Außenfläche, zeigt, daß letztere mit der Stoßfront identisch ist. Aus den Photographien ist zu ersehen, daß die Oberfläche des Feuerballes, die bisher etwas undeutlich gewesen ist, jetzt ganz scharf abgegrenzt ist.

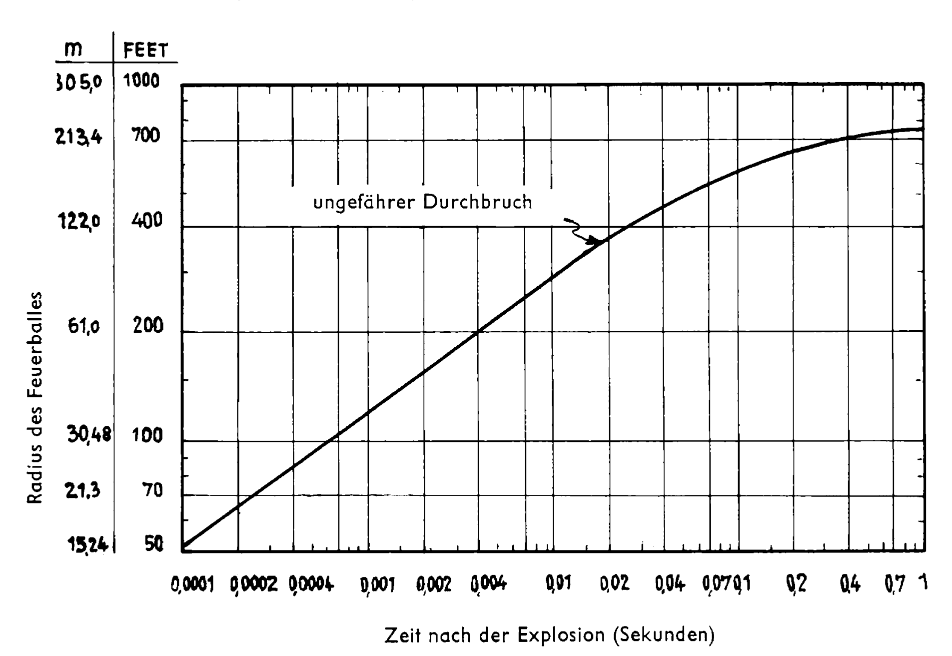


Bild 2.85 Veränderung des Radius des leuchtenden Feuerballes mit der Zeit bei einem 20-kt-Atomsprengkörper

2.84 Die Größe des Feuerballes nimmt noch einige Zeit weiter mit einer Geschwindigkeit zu, die von der Ausbreitung der Stoßfront in der umgebenden Luft abhängt. Während dieser Zeit nimmt der Druck der Stoßfront ständig ab, so daß die Luft, durch welche die Stoßfront sich bewegt, immer weniger leuchtend wird. Schließlich durchbricht die noch schwach sichtbare Stoßfront das viel heißere und immer noch glühende Innere des Feuerballes (Bild 2.28). Das Eintreten dieses Zustandes – etwa 0,017 Sekunden nach der Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers – wird als »Durchbruch« bezeichnet.

2.85 Nach dem Durchbruch nimmt der sichtbare Feuerball weiter, jedoch langsamer als vorher, an Größe zu und erreicht nach etwa einer Sekunde seine maximale Größe. In Bild 2.85 ist gezeigt, wie der Radius des Feuerballes innerhalb des Zeitraums von etwa 0,1 Millisekunde (10^{-4} Sekunden) bis 1 Sekunde nach der Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers zunimmt. Es ist darauf hinzuweisen, daß beide Skalen logarithmisch sind, so daß der untere Teil der Kurve (links) keine konstante, sondern vielmehr eine mit der Zeit nachlassende Wachstumsgeschwindigkeit darstellt. Trotzdem erkennt man aus der flacher werdenden Kurve das deutliche Nachlassen der Geschwindigkeit, mit welcher der Feuerball nach dem Durchbruch anwächst.

Explosionswert und Größe des Feuerballes

2.86 Die Ergebnisse zahlreicher Versuche haben gezeigt, daß die maximale Größe des leuchtenden Feuerballes durch ein Umrechnungsgesetz in Form folgender Gleichung dargestellt werden kann:

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{W}{W_0}\right)^{2/5}$$

Hierbei ist R der maximale Radius des leuchtenden Feuerballes bei einem Atomsprengkörper mit einem Explosionswert, der W Kilotonnen Trinitrotoluol (TNT) entspricht; R_0 ist der (bekannte) Wert für einen Bezugssprengkörper von W_0 kt.

2.87 Wenn wir dieses Umrechnungsgesetz anwenden, können wir, zusammen mit den Ergebnissen aus verschiedenen Versuchskernexplosionen, folgendes Verhältnis ableiten:

$$R(m) = 70 \cdot W^{2/5} \qquad (2.87.1)$$

Hiernach kann der maximale Radius des leuchtenden Feuerballes (in m) bei einem W kt TNT entsprechenden Explosionswert leicht errechnet werden.

2.88 Es ist festgestellt worden, daß der Feuerballradius, der benötigt wird, um die Höhe zu berechnen, in welcher eine bestimmte Explosion einen geringfügigen örtlichen Niederschlag verursacht, dem Radius entspricht, der zur Zeit des zweiten Wärmemaximums vorhanden ist (s. Bild 2.92). Die entsprechende Formel für einen Atomsprengkörper von W kt ist

$$R(m) = 55 \cdot W^{2/5} \qquad (2.88.1)$$

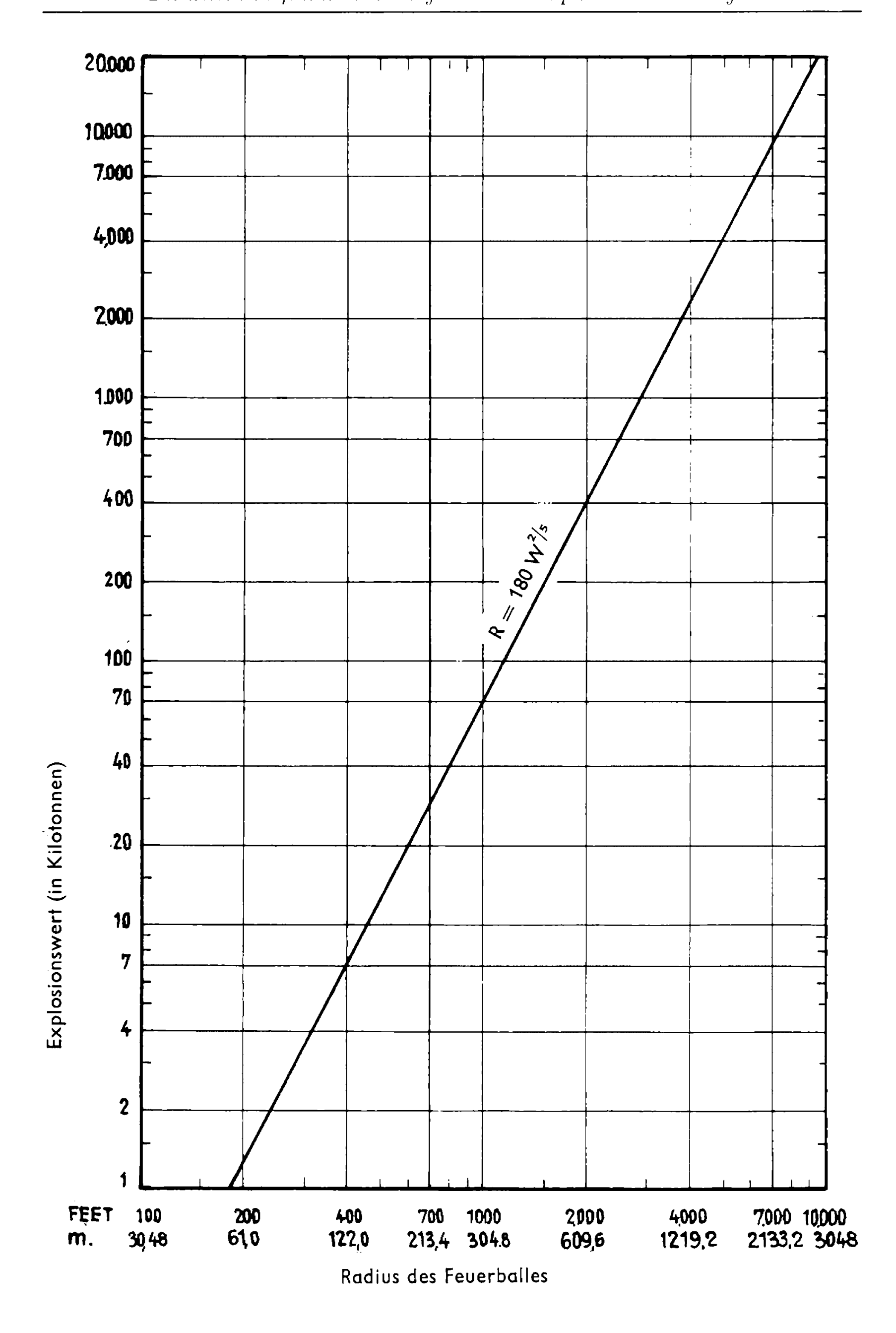


Bild 2.88 Radius des Feuerballes bei örtlichem Niederschlag

wobei R jetzt die Mindesthöhe für geringfügigen örtlichen Niederschlag ist. Diese Formel ist in Bild 2.88 dargestellt.

Für einen Atomsprengkörper von 1000 kt oder 1 Megatonne können wir aus Bild 2.88 oder aus der Gleichung 2.88.1 ersehen, daß der Radius des Feuerballes bei geringfügigem örtlichen Niederschlag 880 m beträgt. Demnach ist bei Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers in einer Höhe von mehr als 880 m zu erwarten, daß in den meisten Fällen der örtliche Niederschlag nach einer solchen Explosion kein ernsthaftes Problem darstellen würde.

Die Temperatur des Feuerballes

2.89 Wie bereits ausgeführt, läßt die Innentemperatur des Feuerballes ständig nach; die scheinbare Oberflächentemperatur, die die thermische Strahlung beeinflußt, nimmt jedoch erst bis zu einem Minimum ab und steigt dann auf ein Maximum an, bevor sie schließlich wieder ständig nachläßt. Dieses eigenartige Verhalten beruht darauf, daß bei Temperaturen über 2300° C die heiße Luft die thermischen Strahlen sehr rasch sowohl absorbiert als auch aussendet; bei niedrigeren Temperaturen absorbiert oder strahlt sie jedoch kaum.

2.90 Wenn sich die Stoßfront, die dann mit dem Äußeren des Feuerballes zusammentrifft, in den ersten Phasen der Explosion ausdehnt, läßt ihre Heftigkeit nach. Die Oberflächentemperatur, die auf der durch den Stoß erhitzten Luft beruht,

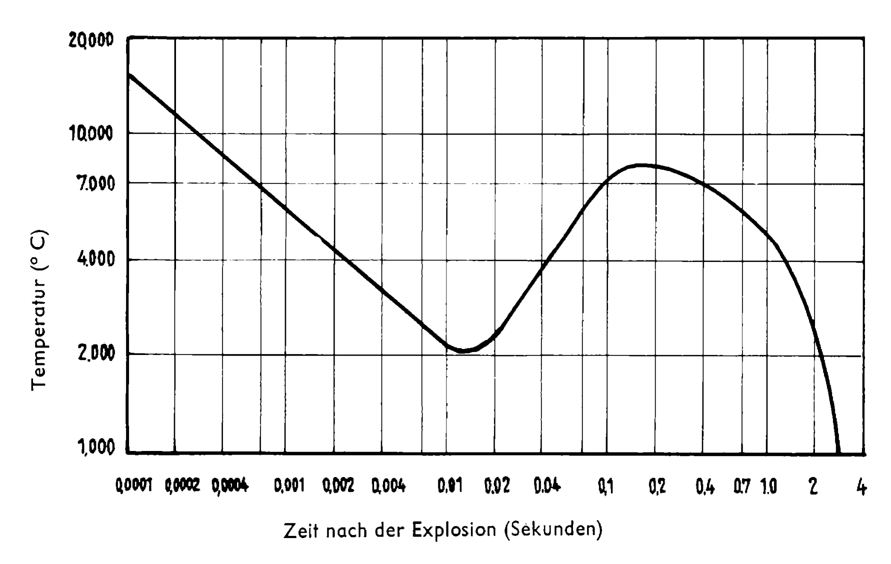


Bild 2.92 Veränderung der scheinbaren Oberflächentemperatur mit der Zeit bei einer 20-kt-Explosion

fällt dann rasch ab. Nach den Gesetzen soll die Strahlungsleistung aus dem Feuerball proportional zu $R^2 T^4$ sein, wobei R der Radius zu einem beliebigen Zeitpunkt und T die entsprechende (absolute) Oberflächentemperatur ist (s. Abschn. 7.109). Obwohl R mit der Zeit zunimmt, nimmt T so rasch ab, daß die Größe $R^2 T^4$ ebenfalls abnimmt. In der Nähe des Durchbruchspunktes ist sie so gering geworden, daß die durch den Stoß erhitzte Luft nicht mehr leuchtet, d. h. die Strahlungsleistung aus der Stoßfront ist dann nur noch unbedeutend.

2.91 Da die Stoßfront keine Strahlen aussenden kann, kann sie jetzt auch keine Strahlen absorbieren, und deshalb beginnt die Luft hinter der Stoßfront, die eine höhere Temperatur hat, sichtbar zu werden. Damit fängt die scheinbare Oberflächentemperatur, die auf ein Minimum von etwa 2100° C gefallen war, wieder an zu steigen. Wenn die vom Stoß betroffene Luft vor der Strahlungsfront aufhört zu glühen, nimmt die scheinbare Oberflächentemperatur des Feuerballes auf Grund des allmählichen Freiwerdens der heißen isothermischen Sphäre ständig zu, bis die Temperatur der letzteren erreicht ist; dies entspricht dem etwa 0,15 Sekunden nach der Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers und 1 Sekunde nach einer 1-Megatonnen-Explosion erreichten Maximum von etwa 8000° C. Danach fällt auf Grund der Abkühlung der heißen Gase durch Strahlung und Ausdehnung die jetzt wieder ziemlich einheitliche Temperatur des ganzen Feuerballes laufend ab.

2.92 Bild 2.92 zeigt die Veränderung der scheinbaren Oberflächentemperatur des Feuerballes mit der Zeit von 10^{-4} Sekunden bis 3 Sekunden nach einer 20-kt-Kernexplosion.

Entsprechend dem raschen Anwachsen des Feuerballes innerhalb der ersten Hundertstelsekunde (Bild 2.85) fällt die scheinbare Oberflächentemperatur plötzlich von etwa 15000° C nach 10^{-4} Sekunden (0,1 Millisekunde) auf etwa 2100° C nach 0,013 Sekunden (13 Millisekunden) ab und erreicht damit das Wärmeminimum. Darauf folgt etwa 0,15 Sekunden nach der Explosion ein verhältnismäßig langsames Ansteigen der Temperatur auf ein Maximum von 8000° C, gefolgt von einem über mehrere Sekunden anhaltenden Temperaturrückgang, bis die umgebende atmosphärische Temperatur erreicht ist. Zu diesem Zeitpunkt ist der Feuerball natürlich nicht mehr als solcher sichtbar, und an seine Stelle ist die Atomwolke getreten.

2.93 Wie oben gesagt, beziehen sich die Kurven der Bilder 2.85 und 2.92 auf eine 20-kt-Kernexplosion; bei Explosionen mit anderen Explosionswerten sind aber ähnliche Ergebnisse erzielt worden. Die Wachstumsgeschwindigkeit des Feuerballes hängt, wie aus den Gleichungen 2.87.1 und 2.88.1 ersichtlich, von dem tatsächlichen Explosionswert des Atomsprengkörpers ab, ebenso der Radius des Feuerballes. Die Durchbruchszeit nimmt mit dem Explosionswert des Atomsprengkörpers zu; das gleiche trifft für die Zeit zu, in welcher danach die Höchsttemperatur eintritt (s. Abschn. 7.112). Die jeweiligen Temperaturen sind jedoch im wesentlichen unabhängig vom Explosionswert.

Die Atomsprengkörper und das Wetter

2.94 Von Zeit zu Zeit, besonders nach einer Reihe von Versuchsexplosionen im Pazifik oder in Nevada, sind Betrachtungen über den möglichen Einfluß von Kernexplosionen auf das Wetter angestellt worden. Diese Betrachtungen basieren hauptsächlich auf zwei Erwägungen: erstens nahm man an, daß die durch die Explosionen der Atmosphäre hinzugefügte Energie den bestehenden Wetterverlauf ändern könnte, und zweitens, daß die Explosionswirkungen eine viel größere natürliche Energiemenge von dem Weg ablenken könnten, den sie sonst genommen hätte.

2.95 Die Zuführung von Energie an die Atmosphäre scheint kein Faktor von Bedeutung zu sein, da die Menge der bei einer Kernexplosion freiwerdenden Energie im Vergleich zu der mit den meisten meteorologischen Erscheinungen verbundenen Energiemenge nicht groß ist. Ferner wird die Energie nicht in einer Weise erzeugt, die zu Wetterveränderungen beitragen könnte. Es besteht die Möglichkeit, daß die Atmosphäre in einem labilen Zustand ist, dann könnte der plötzliche Impuls einer Kernexplosion eine Wetterveränderung hervorrufen, die sonst nicht eingetreten wäre. Soweit eine Gewitterbildung in Frage kommt, wird angenommen, daß das Freiwerden von Energie bei einer Kernexplosion so rasch erfolgt, daß die Wetterverhältnisse nicht innerhalb einer begrenzten Zeitspanne so umgewandelt werden könnten, um die zusätzliche Energie auszunutzen.

2.96 Es gibt drei annehmbar erscheinende Möglichkeiten, durch welche die Wirkungen einer Kernexplosion indirekt, d. h. durch ein Auslösungsmittel, Wetterveränderungen hervorgerufen könnten:

1. Der durch die Explosion in die Luft geschleuderte Schutt kann bewirken, daß vorhandene Wolken Kristallisationskerne bilden und damit das Bewölkungs- oder Niederschlagsbild auf weiten Gebieten verändert wird;

2. Die Radioaktivität der Sprengkörperrückstände verändert die elektrische Leitfähigkeit der Luft, und dies kann einen Einfluß auf wahrnehmbare meteorologische Erscheinungen haben;

3. Der in die Stratosphäre gelangende Schutt kann auf die Übertragung von Strahlungsenergie aus der Sonne einwirken und damit eine Verringerung der Erdtemperatur bewirken.

Diese Möglichkeiten sollen nacheinander erörtert werden.

2.97 Obwohl die Versuchsmethoden der Kristallisationskernbildung noch nicht sehr weit entwickelt sind und zur Zeit noch weiter studiert werden, hat sich bisher doch erwiesen, daß Sprengkörperschutt keine Kristallisationskernbildung bewirkt. Es ist zwar richtig, daß nach der Kernexplosion über Hiroshima im August 1945 Regen fiel; es scheint aber sicher zu sein, daß dies weitgehend – wenn auch nur indirekt – auf ausgedehnten Bränden beruhte, die für mehrere Stunden nach der Explosion eine Konvektion unterstützten. Eine ähnliche Erscheinung ist bei geeigneten Luftmasseverhältnissen bei einem »Feuersturm« über großen Waldbränden und über brennenden Städten nach dem 2. Weltkrieg beobachtet worden. Jedoch

sind bei den zahlreichen Versuchsexplosionen mit Kernwaffen keine derartigen Wirkungen beobachtet worden, da diese nicht von Großbränden begleitet waren.

2.98 Innerhalb von 2 oder 3 Stunden nach der »ABLE«-Luftexplosion auf Bikini im Jahre 1946 entwickelten sich leichte Regenschauer über den ganzen nördlichen Marshall-Inseln. Man hat versucht, diese Schauerbildung der Atomwolke zuzuschreiben, aber die Schauer waren sehr weit verstreut und ließen sich durch die herrschenden Wetterverhältnisse leicht erklären. Die Aufzeichnungen zeigen, daß die einzigen erkennbaren Veränderungen der Wind- und Luftverhältnisse die kurzzeitigen Wirkungen des Luftstoßes und der thermischen Strahlung waren. In jedem Falle waren diese Veränderungen nur in unmittelbarer Nähe der Explosion von Bedeutung. Das Wolkenbild über der Lagune war im wesentlichen unverändert, bis auf die direkt mit der Explosion im Zusammenhang stehende Atomwolke.

2.99 Es wird angenommen, daß selbst bei einer hochenergiehaltigen Kernexplosion die durch die radioaktive Materie erzeugte Ionisationsmenge nicht ausreicht, um eine nennenswerte Wirkung auf die allgemeinen Wetterverhältnisse auszuüben. Es erscheint deshalb unwahrscheinlich, daß die Ionisierung bei einer Kernexplosion das Wetter beeinflussen kann.

2.100 Es ist bekannt, daß der bei starken vulkanischen Eruptionen aufgeworfene Staub, wie z. B. beim Krakatau im Jahre 1883, eine bemerkenswerte Abschwächung des die Erde erreichenden Sonnenlichts verursacht. Es ist jedoch nicht festgestellt worden, daß diese Abschwächung einen größeren Einfluß auf das Wetter hat. Selbst bei den stärksten Kernwaffen ist die nach der Explosion in der Luft verbleibende Gesteinsschuttmenge nicht größer als etwa 1% der durch die Krakatau-Eruption aufgeworfenen Menge. Ferner zeigen die Sonnenstrahlenregistrierungen, daß bisher noch keine der Atomexplosionen eine erkennbare Veränderung des am Erdboden festgestellten direkten Sonnenlichtes ergeben hat.

2.101 Die Veränderlichkeit der Wettererscheinungen auf Grund natürlicher Ursachen macht es schwierig zu beweisen (oder zu widerlegen), daß eine Wetterveränderung nach einer Kernexplosion auf der Explosion beruhte. Jedoch geht die Ansicht der maßgebenden Meteorologen sowohl in den Vereinigten Staaten als auch in anderen Ländern dahin, daß – abgesehen von örtlichen Wirkungen in der Nähe des Versuchsfeldes – kein Einfluß von Kernexplosionen auf das Wetter bekannt geworden ist.

KAPITEL III

Die Erscheinungen und Wirkungen des Luftdrucks

Die Merkmale der Druckwelle in der Luft

Entwicklung der Luftdruckwelle

3.1 Der größte Teil der durch einen in der Luft explodierenden Atomsprengkörper entstehenden materiellen Schäden beruht – direkt oder indirekt – auf der Stoß-(oder Luftdruck-)Welle, von der die Explosion begleitet ist. Die meisten Bauten werden durch den Luftdruck beschädigt, wenn der Überdruck in der Luftdruckwelle, d. h. der über den atmosphärischen Druck (1 atü bei normalem Barometerstand) hinausgehende Druck 0,035 atü oder mehr beträgt. Die Entfernung, auf welche sich dieser Überdruck erstreckt, hängt von dem Explosionswert oder der Größe des Sprengkörpers und von der Explosionshöhe ab. Es erscheint deshalb zweckmäßig, die mit einer Druckwelle in der Luft verbundenen Erscheinungen näher zu betrachten.

3.2 Ein Unterschied in dem auf die einzelnen Seiten eines Bauwerks einwirkenden Luftdruck erzeugt eine auf das Bauwerk einwirkende Kraft. Wenn wir die zerstörende Wirkung einer Luftdruckwelle betrachten, so ist eines ihrer Hauptmerkmale der Überdruck. Aus diesem Grunde wird die Veränderung des Überdruckes mit der Zeit und der Entfernung in aufeinanderfolgenden Abschnitten beschrieben. Der

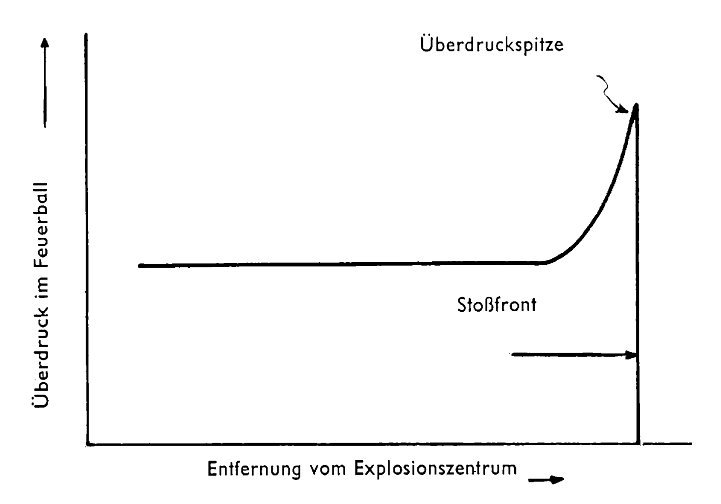


Bild 3.3 Veränderung des Überdruckes in dem Feuerball mit der Entfernung

maximale Wert, d. h. an der Stoßfront, wird »Überdruckspitze« genannt. Weitere charakteristische Merkmale der Luftdruckwelle, z. B. der dynamische Druck, die Dauer und die Ankunftszeit, werden später noch erörtert.

3.3 Wie bereits in Kapitel II dargelegt, verursacht die Ausbreitung der ungeheuer heißen Gase bei außerordentlich hohem Druck in dem Feuerball eine Druckwelle in der Luft, die sich mit hoher Geschwindigkeit nach außen fortsetzt. Das Hauptmerkmal dieser Welle ist, daß der Druck an der Bewegungsfront am stärksten ist und in Richtung zum Explosionszentrum nachläßt. In den ersten Phasen z. B. entspricht die Veränderung des Druckes mit der Entfernung vom Mittelpunkt des Feuerballes zu einem gegebenen Zeitpunkt etwa der Darstellung in Bild 3.3. Man sieht, daß vor dem Durchbruch (s. Abschn. 2.84) die Drücke an der Stoßfront etwa 2mal so hoch sind wie die Drücke im Innern des Feuerballes, die außerordentlich hoch sind.

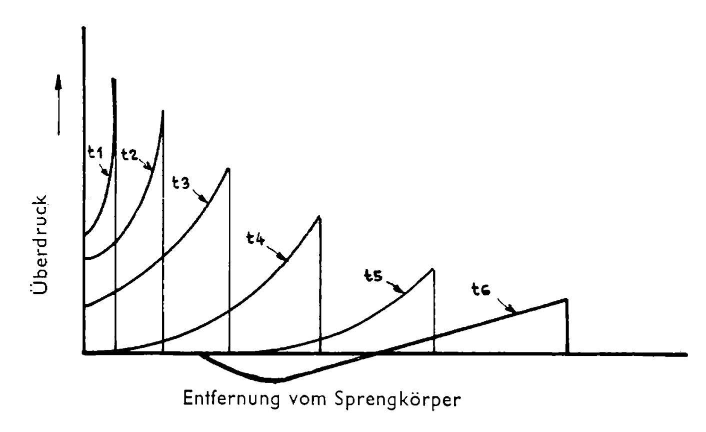


Bild 3.4 Veränderung des Überdruckes mit der Entfernung zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten

3.4 Wenn die Druckwelle sich von ihrer Quelle durch die Luft fortbewegt, fällt der Überdruck an der Front ständig, und der Druck hinter der Front nimmt in regulärer Weise ab. Nach kurzer Zeit, wenn die Stoßfront eine bestimmte Entfernung vom Feuerball zurückgelegt hat, fällt der Druck hinter der Front unter den der umgebenden Atmosphäre, und es bildet sich die sog. »negative Phase« der Luftdruckwelle. Diese Entwicklung ist in Bild 3.4 dargestellt; sie zeigt den Überdruck zu sechs aufeinanderfolgenden Zeitpunkten, die durch die Zahlen 1, 2, 3, 4, 5 und 6 angegeben sind. In den mit t_1 bis t_5 bezeichneten Kurven ist der Druck in der Luftdruckwelle nicht unter den atmosphärischen Druck gefallen, aber in der Kurve t_6 sehen wir, daß in einiger Entfernung hinter der Stoßfront der Überdruck einen negativen Wert hat. In diesem Bereich liegt der Druck unter dem der ursprünglichen (oder umgebenden) Atmosphäre.

3.5 Während der negativen Druckphase (Verdünnungs- oder Sogphase) bildet sich ein teilweise luftleerer Raum, und die Luft wird eingesogen statt weggedrückt, wie es bei dem positiven Überdruck der Fall ist. In der positiven (oder Druck-)Phase weht der Wind – zusammen mit der Luftdruckwelle – von der Explosion fort; in der negativen Phase ist seine Richtung umgekehrt. Am Schluß der negativen Phase ist der Druck im wesentlichen wieder dem umgebenden Druck gleich. Die negativen Überdruckspitzen sind im Vergleich zu den positiven Überdruckspitzen niedrig.

Veränderung des Stoßwellenüberdruckes mit der Zeit

3.6 Vom praktischen Standpunkt aus ist es von Interesse, die Veränderungen des Überdruckes in der Stoßwelle mit der Zeit an einem bestimmten Punkt zu überprüfen. Die Veränderung des Überdruckes mit der Zeit, die einige Sekunden (evtl. bis zu einer halben Minute) nach der Explosion an einem bestimmten Punkt zu beobachten ist, zeigt Bild 3.6. Auf der linken Seite der Abbildung sind die zu erwartenden Wirkungen auf ein leichtes Bauwerk, einen Baum und ein kleines Tier dargestellt.

3.7 Während eines kurzen Zeitraums nach der Explosion erfolgt kein Druckanstieg, da die Luftdruckwelle einige Zeit braucht, um die Entfernung vom Explosionspunkt bis zu dem gegebenen Punkt zurückzulegen. Wenn die Stoßfront ankommt, steigt der Druck plötzlich auf einen hohen Wert an, d. h. auf die oben bereits erwähnte Überdruckspitze. In Bild 3.6 stellt die Zahl »1« den Zeitpunkt der Explosion dar, die Zahl 2 gibt die Ankunftszeit der Stoßfront an. Hier beginnt ein starker Wind von der Explosion fort zu wehen. Dieser wird oft als »vorübergehender« Wind bezeichnet, weil seine Geschwindigkeit mit der Zeit ziemlich schnell nachläßt.

3.8 Nach der Ankunft der Stoßfront fällt der Druck rasch ab, und zu dem Zeitpunkt, der dem Punkt 3 in dem Bild 3.6 entspricht, ist der Druck der gleiche wie der der ursprünglichen (oder umgebenden) Atmosphäre. Obwohl der Überdruck jetzt bei null liegt, weht der Wind noch kurze Zeit in gleicher Richtung weiter. Der Zwischenraum von 2 bis 3, der etwa eine halbe bis eine Sekunde bei einem 20-kt-Atomsprengkörper und zwei bis vier Sekunden bei einem 1-Megatonnen-Atomsprengkörper beträgt, stellt den Durchgang der positiven (oder Druck-)Phase der Luftdruckwelle dar. Während dieser Zwischenzeit ist der größte Teil der zerstörenden Wirkung der Luftexplosion festzustellen.

3.9 Wenn der Druck in der Luftdruckwelle weiter nachläßt, sinkt er unter den der umgebenden Atmosphäre. In dem in Bild 3.6 dargestellten Zeitraum von 3 bis 5, der mehrere Sekunden betragen kann, passiert die negative oder Sogphase der Luftdruckwelle den gegebenen Punkt. Während des größten Teils dieses Zeitraums bläst der vorübergehende Wind in Richtung der Explosion. Während der negativen Phase können einige Zerstörungen verursacht werden; da aber der maximale negative Überdruck stets niedriger ist als die Überdruckspitze an der Stoßfront, ist er im allgemeinen nur unbedeutend. Während der negativen Phase fällt der Druck zunächst

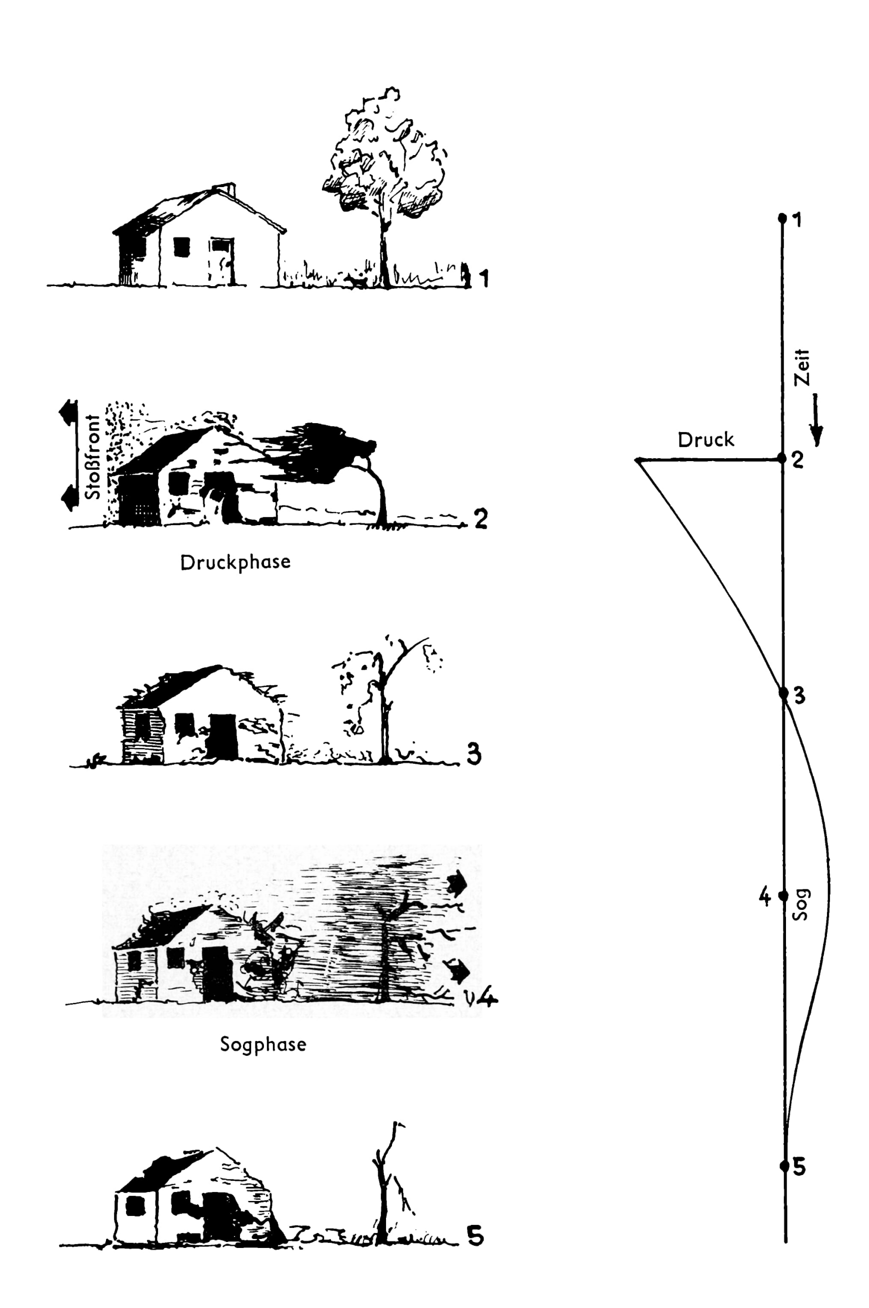


Bild 3.6 *Veränderung des Druckes mit der Zeit an einem bestimmten Punkt, und Wirkung der über ein Gebäude hinweggehenden Luftdruckwelle*

ab. Dann steigt er wieder und hat zu dem mit der Zahl 5 gekennzeichneten Zeitpunkt den Druck der umgebenden Atmosphäre wieder erreicht. Der Luftdruckwind hat dann tatsächlich aufgehört, und die unmittelbare zerstörende Wirkung der Luftdruckwelle ist vorüber. Es können jedoch noch indirekte, durch Brände verursachte zerstörende Wirkungen auftreten (s. Kap. VII).

Der dynamische Druck

3.10 Obwohl die zerstörenden Wirkungen der Luftdruckwelle meist zu den Überdruckspitzenwerten in Beziehung gesetzt worden sind, besteht noch eine andere Größe von gleicher Bedeutung, der sog. »dynamische Druck«. Bei vielen Gebäudetypen hängt der Schadensgrad des Luftdrucks weitgehend von der Luftströmung ab. Die Luftströmung wird von bestimmten Merkmalen des Bauwerks (hauptsächlich von seiner Form und Größe) beeinflußt, ist aber im allgemeinen abhängig von dem Spitzenwert des dynamischen Druckes und seiner Zeitdauer an einem bestimmten Punkt.

3.11 Der dynamische Druck ist eine Funktion der Windgeschwindigkeit und der Luftdichte hinter der Stoßfront. Diese beiden Größen können in Beziehung gesetzt werden zu dem Überdruck bei idealen Bedingungen an der Stoßfront nach bestimmten Gleichungen, die weiter unten angegeben sind (s. Abschn. 3.80). Bei sehr starkem Stoß ist der dynamische Druck größer als der Überdruck, aber bei weniger als 4,830 atü Überdruck in Meereshöhe ist der dynamische Druck geringer. Ebenso wie die Überdruckspitze des Stoßes nimmt der dynamische Spitzendruck mit zunehmender Entfernung vom Explosionszentrum ab, wenn auch in anderem Verhältnis. Tabelle 3.11 bringt Angaben über die entsprechenden Werte der Überdruckspitze, des dynamischen Spitzendruckes und der maximalen Geschwindigkeiten des Luftdruckwindes in Meereshöhe. Man sieht, daß der dynamische Druck mit zunehmender Entfernung rascher abnimmt als der Überdruck der Stoßfront.

Tabelle 3.11 Überdruck, dynamischer Druck und Windgeschwindigkeit in der Luft in Meereshöhe

Überdruckspitze atü	dynamischer Spitzendruck atü	maximale Windgeschwindigkeit km/h
5,04	5,6	1880
3,5	2,8	1515
2,1	1,12	1080
1,4	0,56	595
0,7	0,14	465
0,35	0,05	255
0,14	0,007	115

3.12 An einem gegebenen Punkt ändert sich der dynamische Druck mit der Zeit in etwa ähnlicher Weise wie der Überdruck, jedoch sind die Verhältnisse der Druckverminderung hinter der Stoßfront anders. Dies geht aus Bild 3.12 hervor, das qualitativ angibt, wie die beiden Drücke etwa während der ersten Sekunde nach Ankunft der Stoßfront sich verändern. Beide Drücke steigen scharf an, wenn die Stoßfront den gegebenen Punkt erreicht; danach fallen sie wieder ab. Die Kurven zeigen, wie der Überdruck und der dynamische Druck zur selben Zeit gleich null werden. Die Windgeschwindigkeit (und der dynamische Druck) fallen zwar hauptsächlich wegen des Trägheitsvermögens der sich bewegenden Luft etwas später auf null ab, aber der Unterschied ist für die Zwecke der Schadensberechnung nicht von Bedeutung.

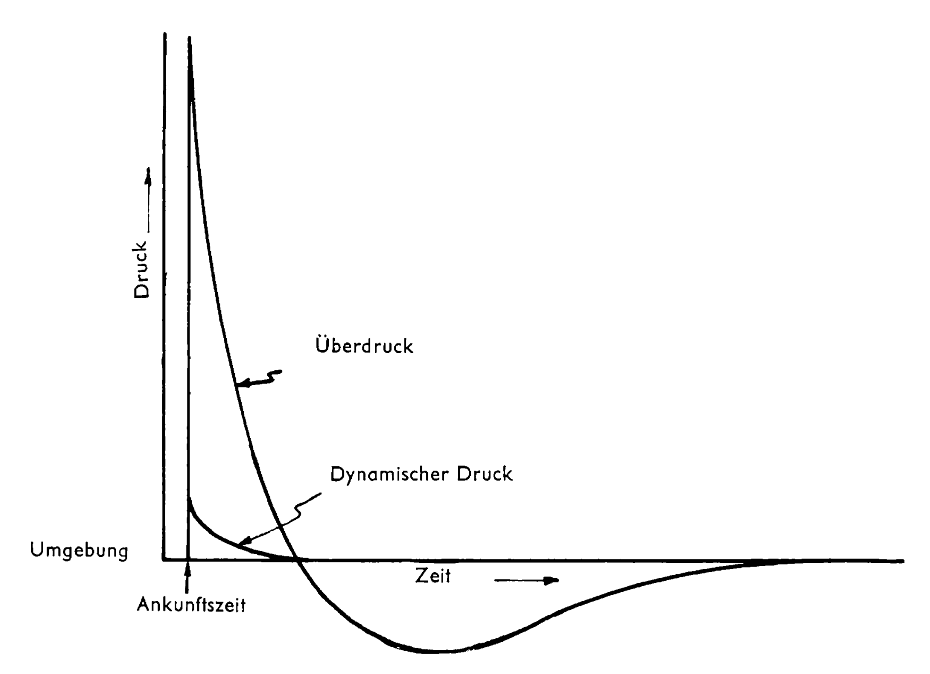


Bild 3.12 Veränderung des Überdrucks und des dynamischen Drucks mit der Zeit an einem bestimmten Punkt

3.13 Während der negativen Überdruckphase der Luftdruckwelle ist der dynamische Druck sehr gering; er wirkt in entgegengesetzter Richtung; deshalb ist auch der während der negativen Überdruckphase entstehende Schaden durch den dynamischen Druck (oder den Winddruck) nur gering.

Ankunftszeit und Dauer der Luftdruckwelle

3.14 Wie bereits ausgeführt, braucht die Luftdruckwelle eine begrenzte Zeit, um sich aus dem Explosionszentrum heraus bis zu einem bestimmten Punkt zu bewegen. Dieses Zeitintervall (oder die Ankunftszeit) hängt von dem Explosionswert und der Entfernung ab. So beträgt die Ankunftszeit bei 1,6 km Entfernung von einer 1-Megatonnen-Explosion etwa 4 Sekunden. Anfangs ist die Geschwindigkeit der Stoßfront sehr groß, sie beträgt ein Vielfaches der Schallgeschwindigkeit; aber mit zunehmendem Vorrücken der Luftdruckwelle nach außen verringert sie sich mit der Abschwächung der Stoßfront. Schließlich wird die Luftdruckwelle auf lange Entfernungen zu einer Schallwelle, und ihre Geschwindigkeit nähert sich etwa der umgebenden Schallgeschwindigkeit.

3.15 Die Dauer der Luftdruckwelle an einem bestimmten Punkt hängt ebenfalls von dem Explosionswert und der Entfernung vom Explosionspunkt ab. Die Dauer der positiven Phase ist bei geringen Entfernungen am kürzesten und nimmt mit der Ausdehnung der Luftdruckwelle nach außen zu. In einer Entfernung von 1,6 km vom Explosionspunkt eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers z. B. beträgt die Dauer der positiven Phase der Luftdruckwelle etwa 2 Sekunden. Mit der Entwicklung der Luftdruckwelle, die vor Bildung der negativen Phase einsetzt, ist eine minimale positive Dauer verbunden.

3.16 In Abschn. 3.12 ist gesagt, daß die vorübergehende Windgeschwindigkeit hinter der Stoßfront auf null abfällt und dann, etwas nach Schluß der positiven Überdruckphase, wieder ansteigt. Somit kann die Dauer des dynamischen Druckes die Dauer des Überdruckes in unterschiedlichem Ausmaße je nach der Druckhöhe übersteigen. Jedoch sind die nach der positiven Überdruckphase vorhandenen dynamischen Drücke so gering, daß sie nicht von Bedeutung sind. Deshalb kann angenommen werden, daß die Zeitdauer der Wirksamkeit des dynamischen Druckes im wesentlichen gleich der Dauer der positiven Überdruckphase ist, wie auch aus Bild 3.12 hervorgeht.

Die Reflexion der Luftdruckwelle an einer Fläche

Die einfallende und die reflektierte Welle

3.17 Wenn die einfallende Luftdruckwelle bei einer Luftexplosion auf ein dichteres Medium, z. B. die Erdoberfläche (Land oder Wasser) auftrifft, wird sie reflektiert. Die Bildung der reflektierten Stoßwelle ist in Bild 3.17 dargestellt. Hier sind 4 Stadien der Bewegung der kugelförmigen Stoßwelle bei einem in der Luft explodierenden Atomsprengkörper aufgezeigt. Im ersten Stadium hat die Stoßfront den Boden noch nicht erreicht; das zweite Stadium ist etwas später, und im dritten Stadium ist eine reflektierte Welle entstanden, die durch die punktierte Linie dargestellt ist.

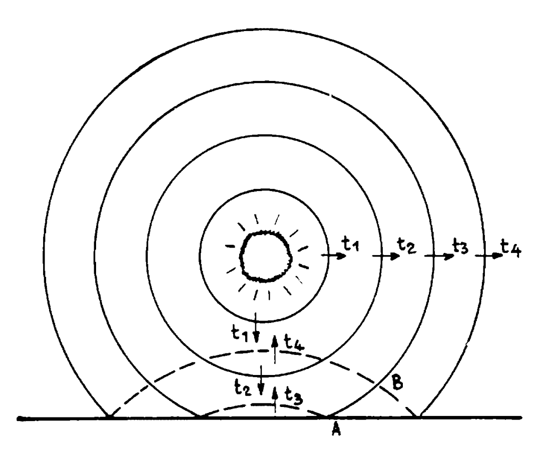


Bild 3.17 *Reflexion der Luftdruckwelle an der Erdoberfläche bei einer Luftexplosion; t_1 bis t_4 stellen die aufeinanderfolgenden Zeiten dar.*

3.18 Bei einer solchen Reflexion erhält ein genau an der Oberfläche befindlicher Mensch oder Gegenstand einen einzigen Stoß, da sich die reflektierte Welle augenblicklich bildet. Deshalb wird der an der Oberfläche ausgeübte Überdruck nur als reflektierter Druck angesehen. In dem Bereich nahe dem Nullpunkt ist der gesamte reflektierte Überdruck mehr als doppelt so groß wie die Überdruckspitze der einfallenden Luftdruckwelle. Der genaue Wert des reflektierten Druckes (s. Abschn. 3.80 und 3.81) hängt von der Stärke der Einfallswelle und dem Winkel ab, in welchem diese auf die Oberfläche auftrifft. Die Veränderung des Überdruckes mit der Zeit, die an einem Punkt der Erdoberfläche auftritt, welcher nicht zu weit vom Nullpunkt entfernt ist – s. A in Bild 3.17 – ist in Bild 3.18 dargestellt. Punkt A kann als im

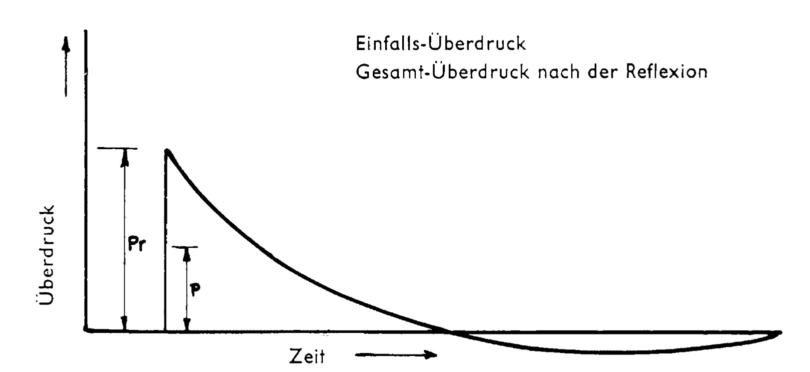


Bild 3.18 *Veränderung des Überdruckes mit der Zeit an einem Punkt der Erdoberfläche im Bereich der regulären Reflexion*

Bereich der »regulären« Reflexion liegend angenommen werden, d. h. die einfallende und die reflektierte Welle vereinigen sich über der Erdoberfläche nicht.

3.19 An jedem beliebigen Punkt über der Erdoberfläche in diesem Bereich werden zwei getrennte Stöße spürbar, von denen der erste auf der einfallenden Luftdruckwelle und der zweite auf der kurze Zeit später ankommenden reflektierten Welle beruht (s. Bild 3.19). Dies wird durch Punkt B in Bild 3.17 veranschaulicht, der ebenfalls im Bereich der regulären Reflexion liegt. Wenn die einfallende Stoßfront diesen Punkt erreicht, ist die reflektierte Welle noch in einiger Entfernung. Deshalb tritt eine kurze Pause ein, bis die reflektierte Welle den Punkt über der Erdoberfläche erreicht. Zu der gleichen Zeit hat sich die reflektierte Welle in gewissem Maße ausgebreitet, so daß ihre Überdruckspitze niedriger ist als der an der Erdoberfläche gemessene Wert. Bei der Ermittlung der Wirkungen des Luftdruckes auf Bauten im Bereich der regulären Reflexion müssen die Stärke und auch die Bewegungsrichtung sowohl der einfallenden als auch der reflektierten Welle berücksichtigt werden. Nach Durchgang der reflektierten Welle wird der vorübergehende Wind in der Nähe der Erdoberfläche im wesentlichen horizontal.

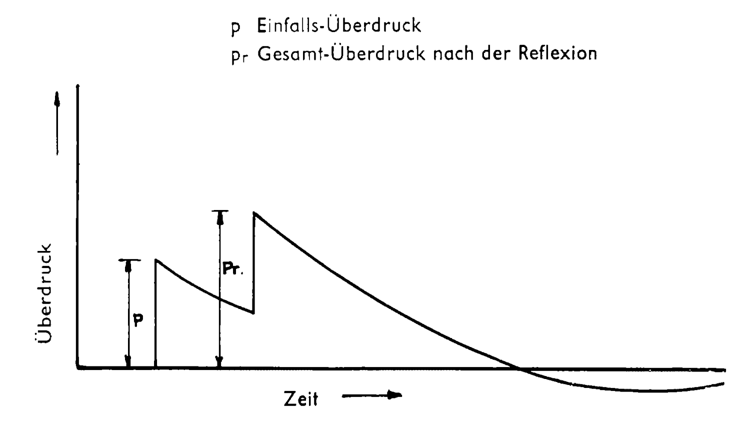


Bild 3.19 Veränderung des Überdruckes mit der Zeit an einem Punkt über der Oberfläche im Bereich der regulären Reflexion

Der Machsche Effekt

3.20 Die vorstehenden Ausführungen über den Zeitraum zwischen der Ankunft der einfallenden und der reflektierten Stoßfront an einem Punkt über der Erdoberfläche (s. Bild 3.17, B) basieren auf der Annahme, daß die beiden Wellen sich mit ungefähr gleicher Geschwindigkeit bewegen. Diese Annahme ist auch in den ersten Stadien gerechtfertigt, wenn die Stoßfront nicht weit vom Nullpunkt entfernt ist. Es wird sich jedoch zeigen, daß die reflektierte Welle sich stets durch Luft bewegt,

welche durch die einfallende Welle erwärmt und verdichtet worden ist. Deshalb bewegt sich die reflektierte Stoßfront schneller als der einfallende Stoß und überholt diesen schließlich unter bestimmten Voraussetzungen, so daß die beiden Stöße sich zu einem einzigen Stoß vereinigen. Dieser Wechselwirkungsprozeß wird Machsche oder irreguläre Reflexion genannt. Der Bereich, in welchem die beiden Wellen sich vereinigt haben, wird deshalb der Machsche (oder irreguläre) Bereich genannt im Gegensatz zum regulären Bereich, in dem sie sich nicht vereinigt haben.

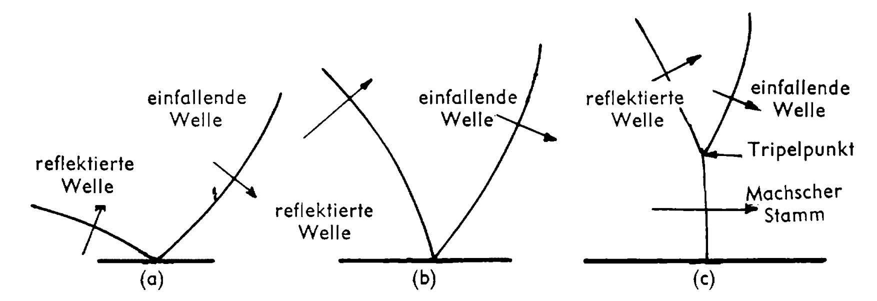


Bild 3.21 *Vereinigung der einfallenden und der reflektierten Welle und Bildung des Machschen Stammes*

3.21 Die Vereinigung der einfallenden und der reflektierten Stoßfront ist in Bild 3.21 schematisch dargestellt. Wir sehen hier einen Teil des Schnittes durch eine Druckwelle dicht an der Erdoberfläche. Bild 3.21a zeigt die Situation an einem Punkt ziemlich dicht am Nullpunkt, z. B. A in Bild 3. In einem späteren Stadium, weiter vom Nullpunkt entfernt (Bild 3.21b) zeigt die steilere Front der reflektierten Welle, daß sie sich schneller bewegt als die einfallende Welle und diese überholt. In einem durch Bild 3.21c dargestellten Stadium hat die reflektierte Stoßwelle in der Nähe des Erdbodens die einfallende Welle überholt und sich mit ihr zu einer einzigen Stoßfront, dem sog. »Machschen Stamm«[1]), vereinigt. Der Punkt, an dem sich der einfallende und der reflektierte Stoß und die Machsche Front treffen, wird »Tripelpunkt« genannt.

3.22 Wenn die reflektierte Welle die einfallende Welle immer mehr überholt, steigt der Tripelpunkt, und die Höhe des Machschen Stammes wird größer (Bild 3.22). Jedes im Machschen Bereich befindliche Objekt am oder über dem Erdboden und unter dem Tripelpunktweg erhält einen einzigen Stoß. Das Verhalten dieses vereinigten oder Machschen Stoßes ist das gleiche wie das früher bei Stoßfronten im allgemeinen beschriebene. Der Überdruck an einem bestimmten Punkt fällt mit der Zeit ab, und der positiven (oder Druck-)Phase folgt eine negative (oder Sog-)Phase, wie in Bild 3.6 dargestellt.

[1]) Anm. des Übersetzers: In Deutschland »Machsches V« genannt.

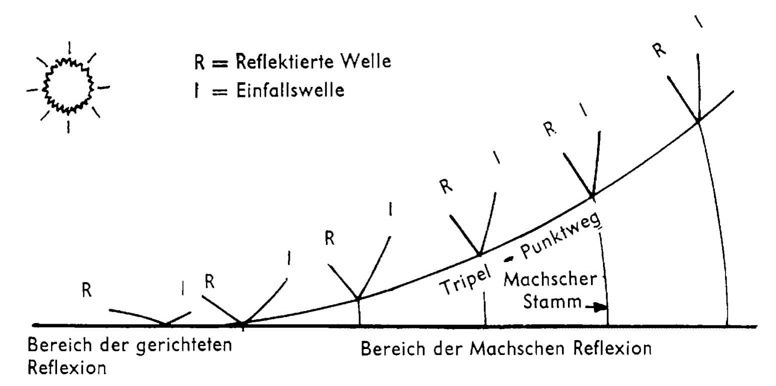


Bild 3.22 Auswärtsbewegung der Luftdruckwelle in der Nähe der Erdoberfläche im Machschen Bereich

3.23 An den Punkten in der Luft über dem Tripelpunktweg, z. B. in einem Flugzeug oder auf einem hohen Gebäude, werden zwei Stöße empfunden. Der erste beruht auf der einfallenden Luftdruckwelle, und der zweite, kurze Zeit später auftretende beruht auf der reflektierten Welle. Explodiert ein Atomsprengkörper an der Erdoberfläche, d. h. handelt es sich um eine Bodenexplosion, so entwickelt sich nur eine einzige Gesamtwelle. Deshalb ist am oder über dem Erdboden nur ein einziger Stoß zu spüren.

3.24 Bezüglich der zerstörenden Wirkung des Luftdrucks muß auf mindestens 2 bedeutende Punkte des Reflexionsprozesses aufmerksam gemacht werden:

1. Im Machschen Bereich unter dem Tripelpunkt ist nur ein einziger Stoß zu spüren im Vergleich zu dem Bereich der regulären Reflexion, in dem die einfallende und die reflektierte Welle getrennt auftreten;

2. Da der Machsche Stamm nahezu senkrecht steht, bewegt sich die ihn begleitende Luftdruckwelle in horizontaler Richtung an der Erdoberfläche, und die vorübergehenden Winde laufen ungefähr parallel zum Erdboden (Bild 3.21). Somit werden im Machschen Bereich die Luftdruckkräfte auf oberirdische Bauten und andere Objekte nahezu waagerecht gelenkt, so daß senkrechte Flächen stärker als waagerechte belastet werden.

3.25 Die Entfernung vom Nullpunkt, in welcher das Machsche V beginnt und der Machsche Stamm sich bildet, hängt von dem Explosionswert und der Explosionshöhe über dem Erdboden ab. Bei Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers beginnt der Machsche Stamm etwa 2 km vom Nullpunkt an, sich zu bilden. Nähert sich der Explosionspunkt dem Erdboden, so verringert sich diese Entfernung. Explodiert der Sprengkörper in größerer Höhe, so beginnt das Machsche V weiter entfernt vom Nullpunkt. Erfolgt die Luftexplosion in genügend großer Höhe über dem Erdboden, dann tritt die reguläre Reflexion ein, und es kann sich kein Machscher Stamm bilden.

Explosionshöhe und Luftdruckschäden

3.26 Die Explosionshöhe und der Explosionswert der Kernexplosion sind bedeutende Faktoren für die Ermittlung des Schadensbereiches an der Erdoberfläche. Diese beiden Größen erklären im allgemeinen die Veränderung des Druckes mit der Entfernung vom Nullpunkt und andere damit verbundene Merkmale der Luftdruckwelle, z. B. die Entfernung vom Nullpunkt, in welcher der Machsche Stamm sich zu bilden beginnt. Bei geringerer Höhe einer Explosion von gegebenem Explosionswert ergibt sich folgendes:

1. die Machsche Reflexion beginnt näher am Nullpunkt;
2. der Überdruck an der Erdoberfläche nahe dem Nullpunkt wird größer.

Eine Bodenexplosion führt zu den größtmöglichen Überdrücken nahe dem Nullpunkt. Außerdem sind Kraterbildung und Erdstöße zu beobachten, wie in Kap. V beschrieben. Auf die Unterschiede der Luftdruckmerkmale zwischen einer Bodenexplosion und einer Luftexplosion wird weiter unten Bezug genommen.

3.27 Wegen der Beziehung zwischen dem Explosionswert und der zur Erzielung bestimmter Luftdruckwirkungen erforderlichen Explosionshöhe kann ein Atomsprengkörper von hohem Explosionswert in einer Höhe von mehreren tausend m über dem Erdboden explodieren, und die Merkmale der hierbei auftretenden Luftdruckwelle werden etwa ähnlich sein wie bei einer Bodenexplosion. Dagegen wird die in gleicher Höhe erfolgende Explosion eines Sprengkörpers von geringerem Explosionswert die Merkmale einer Explosion in großer Höhe aufweisen.

3.28 Bei den Kernexplosionen über Japan während des zweiten Weltkrieges in Hiroshima und Nagasaki betrug die Explosionshöhe etwa 565 m. Es wurde geschätzt – und dies ist später durch Kernexplosionsversuche bestätigt worden –, daß in den in Frage kommenden Zielgebieten eine 20-kt-Explosion in dieser Höhe maximale Luftdruckschäden an Bauten über Gelände verursacht. Eine einzige optimale Explosionshöhe gibt es in bezug auf die Luftdruckwirkungen bei bestimmten Explosionswerten eigentlich nicht, weil die gewählte Explosionshöhe von der Art des Zieles bestimmt wird. In der Regel werden massive (oder harte) Ziele Explosionen in geringer Höhe oder am Erdboden erfordern. Bei weniger massiven Zielen, die schon bei verhältnismäßig niedrigem Überdruck oder dynamischem Druck zerstört oder beschädigt werden, kann die Explosionshöhe gesteigert werden, um das Schadensgebiet zu vergrößern, da durch den Machschen Effekt die Entfernungen, auf welche sich niedrige Drücke erstrecken, weiter ausgedehnt werden.

Bodenexplosionen

3.29 Die allgemeinen Luftdruckerscheinungen, die sich bei einer Bodenexplosion ergeben, sind etwas anders als bei der oben beschriebenen Luftexplosion. Bei einer Bodenexplosion ist die Front der Druckwelle in der Luft halbkugelförmig, wie in

Bild 3.29 dargestellt. Hierbei gibt es keinen Bereich regulärer Reflexion, und alle Objekte und Bauten auf der Erdoberfläche werden – selbst dicht am Nullpunkt – einem ähnlichen Luftdruck ausgesetzt wie in dem Machschen Bereich unter dem Tripelpunkt bei einer Luftexplosion. Deshalb kann angenommen werden, daß die

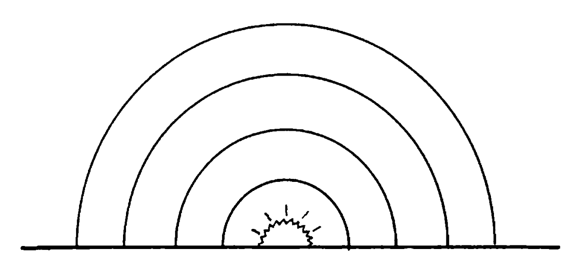


Bild 3.29 Luftdruckwelle einer Bodenexplosion; die einfallende und die reflektierte Welle decken sich.

Stoßfront bei den meisten Bauten in der Nähe des Erdbodens senkrecht verläuft, wobei, wie oben beschrieben, der Überdruck und der dynamische Druck hinter der Stoßfront nach verschiedenen Gesetzen nachlassen. Die vorübergehenden Luftströmungen hinter der Stoßfront nahe der Erdoberfläche laufen im wesentlichen horizontal.

Veränderungen der Luftdruckerscheinungen

Einfluß der Geländeform

3.30 Stark hügelige Gelände sind geeignet, die Luftdruckwirkungen in manchen Gebieten zu steigern und sie in anderen zu verringern. Die Steigerung oder Verringerung der Überdruckspitzen an der Erdoberfläche ist abhängig von der Abweichung der Geländeneigung von der Horizontalen. Bei sehr steilen Hängen kann durch den Reflexionsprozeß an der Vorderseite eines Hügels eine vorübergehende, kurzzeitige Zunahme der Überdruckspitze bis auf das Doppelte stattfinden. Auf dem Hinterhang eines Hügels kann, wenn er ebenfalls sehr steil ist, eine Verringerung der Überdruckspitze erfolgen. Im allgemeinen hängt der Unterschied zwischen dem Überdruck an einem beliebigen Punkt des Hügels und dem Überdruck, der zu erwarten wäre, wenn der Hügel nicht vorhanden wäre, von der Größe des Hügels im Vergleich zur Stärke und örtlichen Lage der Explosion ab. Da das Zeitintervall, in welchem der Druck steigt oder fällt, im Vergleich zur Dauer der positiven Phase kurz ist, ist der Einfluß der Geländeform auf die Luftdruckwelle für sehr viele Gebäudetypen nicht von Bedeutung.

3.31 Es muß ganz besonders darauf hingewiesen werden, daß eine Abschirmung gegen die Luftdruckwirkungen hinter der Stirnseite eines großen Hügels nicht von der Blicklinie abhängt. Mit anderen Worten: die Tatsache, daß der Explosionspunkt

von der Rückseite des Hügels nicht sichtbar ist, bedeutet keinesfalls, daß die Luftdruckwirkungen nicht spürbar werden. Wir werden nachstehend noch sehen, daß die Luftdruckwellen scheinbare Hindernisse leicht umfließen oder umströmen können.

3.32 Obwohl Bodenerhebungen ein bestimmtes Ziel vor der thermischen Strahlung und vielleicht auch in gewissem Ausmaße vor der Anfangsstrahlung schützen können, ist doch nur eine geringe Verminderung der Luftdruckschäden an Bauwerken zu erwarten, sofern nicht ganz besondere Voraussetzungen vorliegen. Jedoch kann für bewegliche Objekte, wie schwere Baumaschinen, ein beträchtlicher Schutz gegen herumfliegende Teile und Winddrücke erreicht werden, indem man sie unter Erdgleiche in offene Ausschachtungen oder tiefe Gräben oder hinter steile Erdanschüttungen stellt. Dieses Thema wird noch ausführlicher in Kap. XII behandelt.

3.33 Die Abweichung von idealisiertem oder flachen Gelände bei einem städtischen Komplex kann als Aufgabe der Topographie angesehen werden. Es ist anzunehmen, daß das Vorhandensein vieler dicht beieinanderstehender Gebäude örtliche Veränderungen der Luftdruckwelle verursachen kann, insbesondere in bezug auf den dynamischen Druck. Objekte und Bauwerke können einige Abschirmung darstellen; jedoch können in anderen Gebieten die vielfachen Reflexionen zwischen den Bauten und den durch die Straßen gebildeten Kanälen den Überdruck und den dynamischen Druck erhöhen. Daher scheint es, daß im großen ganzen der sich ergebende Einfluß auf die Schäden verhältnismäßig gering ist.

Die Wetterverhältnisse

3.34 Das Vorhandensein großer Feuchtigkeitsmengen in der Luft kann die Merkmale einer Luftdruckwelle im Bereich geringen Überdruckes beeinflussen. Aber die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins größerer Mengen Niederschlagswasser, die einen Einfluß auf die Schäden haben würden, wird als gering angesehen.

3.35 Bei entsprechenden Wetterverhältnissen können ein Zerbrechen von Fensterscheiben, leichte bauliche Schäden sowie Lärm in Bereichen von der Explosion entstehen, in welchen derartige Schäden und Lärm nicht zu erwarten wären. Diese Erscheinungen sind bei starken TNT-Detonationen sowie bei Kernexplosionen beobachtet worden. Sie entstehen dadurch, daß die Atmosphäre die Luftdruckwellen auf die eine oder andere von (mindestens) zwei verschiedenen Weisen zur Erde zurückbeugt. Die erstere beruht auf dem Temperaturgefälle und den Windverhältnissen in relativ geringen Höhen, innerhalb der untersten 10 km der Atmosphäre, während die zweite auf den Verhältnissen in bedeutend größeren Höhen, 40 km oder mehr vom Erdboden, beruht.

3.36 Wenn bei zunehmender Entfernung vom Erdboden die Lufttemperatur abnimmt, wie dies für gewöhnlich am Tage der Fall ist, und dabei ein Wind weht, dessen Geschwindigkeit für 300 m Höhenzuwachs um mehr als 5 km/h zunimmt, wird die Luftdruckwelle innerhalb der ersten 1000 m in der Atmosphäre zum Erdboden zurückgeworfen. Sind die Verhältnisse so, daß mehrere Stoßwellen an

einem Punkt am Erdboden zusammentreffen, dann wird dort die Konzentration von Luftdruckenergie weit größer sein, als dies sonst in dieser Entfernung der Fall wäre. Für gewöhnlich liegt der erste (oder direkte) Brennpunkt innerhalb einer Entfernung von 13 bis 16 km von der Explosion. Da aber die Konzentration von Luftdruckenergie vom Erdboden reflektiert und von der Atmosphäre wieder zurückgebeugt wird, kann sich der Brennpunkt in regelmäßigen Entfernungen wiederholen. So ist bekannt, daß durch die Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers in einer Entfernung von 120–160 km die Fensterscheiben zerbrachen.

3.37 Eine ähnliche Druck- (und Lärm-)Steigerung bei starken Explosionen ist bei größeren Entfernungen von 110–130 km im Winter und 190–240 km im Sommer festgestellt worden. Man hat dies damit erklärt, daß in einer Höhe von 40–65 km die Stoßwellen von einer verhältnismäßig warmen Luftschicht, der sog. Ozonsphäre, nach unten geworfen (oder gebeugt) und in einem Brennpunkt vereinigt werden. Eine wiederholte Reflexion vom Erdboden und eine damit verbundene Brechung durch die Ozonsphäre bewirken, daß dieser Prozeß sich in bestimmten Zeitabständen wiederholt. Deshalb kann eine starke Explosion auf noch größere Entfernungen als den oben erwähnten deutlich hörbar sein.

Einfluß der Höhe

3.38 Das Verhältnis zwischen Überdruck, Entfernung und Zeit, das die Ausbreitung einer Luftdruckwelle in der Luft kennzeichnet, hängt von den umgebenden atmosphärischen Verhältnissen ab, und diese sind je nach Höhe verschieden. Bei der Betrachtung der Höhenwirkungen auf die Luftdruckerscheinungen werden zwei Fälle in Betracht gezogen; in dem einen Fall liegen Explosionspunkt und Ziel in gleicher Höhe, aber nicht unbedingt in Meereshöhe; im zweiten Fall liegen Explosionspunkt und Ziel in verschiedener Höhe.

3.39 Bei einer Bodenexplosion hängt der Überdruck in einer gegebenen Entfernung von der Explosion von dem umgebenden Luftdruck ab, und dieser ist je nach Explosionshöhe verschieden. Weiter unten (Abschn. 3.89) ist eine Anzahl einfacher Korrekturfaktoren aufgeführt, mit deren Hilfe die Unterschiede in den Verhältnissen der Umgebung berücksichtigt werden können; fürs erste genügt es jedoch, die allgemeinen Schlußfolgerungen anzuführen. Mit zunehmender Höhe des Ziel- und des Explosionspunktes nimmt der Überdruck in einer gegebenen Entfernung von einer Explosion bestimmter Größenordnung im allgemeinen ab. Dementsprechend ist für gewöhnlich mit einer Verlängerung der Ankunftszeit der Stoßfront und der Dauer der positiven Phase der Luftdruckwelle zu rechnen. Bei Höhen von weniger als 1500 m über dem Meeresspiegel sind die Veränderungen nur gering, und da die meisten Ziele in geringeren Höhen liegen, ist es selten erforderlich, Korrekturen vorzunehmen.

3.40 Liegen Explosion und Ziel in verschiedener Höhe, wie dies bei einer Explosion hoch in der Luft der Fall ist, so sind die Auswirkungen etwas komplizierter. Da

die Luftdruckwelle von den Veränderungen der Lufttemperatur und des Druckes in der Luft, durch die sie wandert, beeinflußt wird, kann mit einigen Veränderungen der Druck-Entfernung-Beziehung an der Oberfläche gerechnet werden. Innerhalb des Bereichs stark zerstörender Überdrücke sind diese Unterschiede bei Sprengkörpern von geringem Explosionswert nur gering. Bei Sprengkörpern mit sehr hohen Explosionswerten, bei denen die Luftdruckwelle erheblich größere Entfernungen zurücklegt, ist mit örtlichen Veränderungen, wie Temperaturumkehrungen und Brechung der Welle zu rechnen. Deshalb ist eine genaue Kenntnis der Atmosphäre an einem bestimmten Tage erforderlich, um genaue Berechnungen anstellen zu können. Für Planungszwecke jedoch können die oben erwähnten Korrekturfaktoren, falls notwendig, bei einer Luftexplosion auf die Verhältnisse des Zielgebietes angewandt werden, sofern das Ziel sich in einer größeren Höhe über dem Meeresspiegel befindet.

Einfluß der Bodenoberfläche

3.41 Bei einer gegebenen Explosionshöhe und einem gegebenen Explosionswert kann mit einer Veränderung der Luftdruckwellenmerkmale bei verschiedenen Bodenoberflächen gerechnet werden. Diese Veränderungen werden hauptsächlich durch die Art und den Umfang der Bodenoberfläche bestimmt, über die die Luftdruckwelle hinweggeht. Bei einer Explosion in geringer Höhe oder bei einer Bodenexplosion, bei der eine Stoßwelle im Erdboden entsteht, tritt ein gewisser Energieverlust ein. Dieser ist in Abschn. 3.43 noch ausführlicher erörtert. Die Art der reflektierenden Fläche und ihre Unebenheit können die Druck-Entfernung-Beziehung sowie die Bildung und das Anwachsen des Machschen Stammes bei Luftexplosionen beeinflussen. Im großen ganzen jedoch sind diese mechanischen Wirkungen auf die Luftdruckwelle gering und haben nur wenig Einfluß auf die Schäden. Die weiter unten in diesem Kapitel angeführten Ergebnisse gelten für durchschnittliche Bodenoberflächenverhältnisse.

3.42 In einigem Zusammenhang mit der Beschaffenheit der Bodenoberfläche stehen die Wirkungen der von der Luftdruckwelle bewegten Objekte und Materie. Durch herumfliegendes Gestein und Geröll sowie durch kleinere Teilchen Sand und Staub können Schäden verursacht werden. Diese von der Luftdruckwelle mitgetragene Materie beeinflußt nicht unbedingt den Überdruck an der Stoßfront. In außerordentlich staubreichen Gebieten ist es möglich, daß genügend Staub vorhanden ist, um den dynamischen Druck der Luftdruckwelle und damit die Wirkung auf ein bestimmtes Ziel zu beeinflussen, jedoch würde diese Wirkung wahrscheinlich nur gering sein.

Erdbodenerschütterung durch den Luftstoß

3.43 Ein weiterer Gesichtspunkt des Luftdruckwellenproblems ist die mögliche Wirkung einer Luftexplosion auf unterirdische Bauwerke. Erfolgt eine Explosion ziemlich nahe der Erdoberfläche, so wird ein Teil der Energie in den Erdboden geleitet. Dadurch entsteht eine geringfügige Schwingung im Erdboden, und es wird eine leichte Erdbodenerschütterung erzeugt. Der durch den Luftstoß auf die Erdoberfläche einwirkende Druck wird somit ohne nennenswerte Abschwächung nach unten in dicht unter dem Erdboden befindliche Objekte abgeleitet. Der Hauptdruck im Boden ist fast senkrecht und entspricht an Stärke der Überdruckspitze an der Druckfront. Diese Erscheinungen sind in Kap. V und VI ausführlicher behandelt.

3.44 Im allgemeinen sind bei hohen Luftexplosionen, bei denen am Nullpunkt verhältnismäßig starke Luftstoßdrücke nicht erwartet werden, die Wirkungen der durch den Luftstoß erzeugten Erdbodenerschütterung unbedeutend. Selbst direkt unter dem Explosionspunkt werden unterirdische Bauwerke mittlerer Festigkeit nicht ernstlich beschädigt. Bestimmte Versorgungseinrichtungen, wie Kanalisationsrohre, die in geringer Tiefe dicht am Nullpunkt liegen, können durch die Erdbodenverschiebungen beschädigt werden, jedoch werden Metallrohre im allgemeinen nicht brechen. Bei einer Bodenexplosion, bei der sich ein Krater bildet, sind die Verhältnisse ganz anders (s. Kap. VI).

Die Wirkungen der Luftdruckwelle auf Bauten

Die Luftdruckbelastung

3.45 Das Verhalten eines Objektes oder Bauwerks, das einer Luftdruckwelle aus einer Kernexplosion ausgesetzt wird, kann unter zwei Hauptgesichtspunkten betrachtet werden:

1. die Belastung, d. s. die Kräfte, die sich aus dem Druck des Luftstoßes ergeben;
2. die Reaktion oder Verformung des Bauwerks auf Grund der ungewöhnlichen Belastung.

In der Regel kann angenommen werden, daß die Reaktion gleichbedeutend ist mit dem Schaden, da die bleibende Verformung in entsprechendem Umfange die Brauchbarkeit eines Bauwerks beeinträchtigt. Ein Schaden kann auch durch ein bewegliches Objekt entstehen, das auf den Erdboden oder auf ein anderes mehr oder weniger befestigtes Objekt auftrifft. Zum Beispiel werden umstürzende Fahrzeuge primär beschädigt, wenn sie auf den Erdboden aufschlagen. Ferner bilden Glas- und Holzsplitter, Ziegelsteine, Mauerstücke und andere durch die Luftdruckwelle gelokkerte und durch die Luft geschleuderte Objekte zerstörende Geschosse. Indirekte Schäden dieser Art sind natürlich weitgehend von den Umständen abhängig.

3.46 Die unmittelbaren Schäden an Bauwerken auf Grund des Luftdrucks können verschiedene Formen annehmen. Zum Beispiel kann der Luftstoß stählerne Baugerippe verbiegen, Dächer einstürzen lassen, Wände eindrücken, Platten zertrümmern und Fensterscheiben zerbrechen. Im allgemeinen rührt der Schaden aus irgendeiner Verschiebung oder Verformung her. Nachstehend ist dargelegt, auf welche Weise eine derartige Verschiebung durch eine Kernexplosion entstehen kann.

3.47 Bei einer Luftexplosion trifft die einfallende Luftdruckwelle in senkrechter Richtung auf den Erdboden am Nullpunkt auf. Im Bereich der regulären Reflexion haben die auf die Bauwerke wirkenden Kräfte auch eine bedeutende senkrechte Komponente (vor dem Auftreten der reflektierten Welle). Deshalb tritt anfänglich statt der größtenteils seitlichen Belastung, wie z. B. im Machschen Bereich (Abschnitt 3.24), auch eine merkliche nach unten wirkende Kraft auf, die außer der Verformung auf Grund der Vorwärtsbewegung einen Druck in Richtung des Erdbodens verursacht, z. B. eingedrückte Dächer.

Druckbelastung in der Beugungsphase

3.48 Wenn die Front einer Luftdruckwelle auf die Stirnseite eines Gebäudes auftrifft, so erfolgt eine Reflexion. Dadurch steigt der Überdruck rasch auf mindestens das Doppelte (im allgemeinen auf das Mehrfache) des Überdruckes der einfallenden Stoßfront an. Der tatsächlich erreichte Druck wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, z. B. durch die Stärke des Einfallsstoßes und den Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Stoßwelle und der Stirnseite des Gebäudes. Wenn die Stoßfront sich vorwärtsbewegt, fällt der Überdruck auf der Stirnseite des Gebäudes rasch auf den von der Luftdruckwelle ohne Reflexion erzeugten Überdruck ab[1]). Gleichzeitig umfließt die Luftdruckwelle das Bauwerk, sie wird »gebeugt«, so daß es schließlich vom Luftdruck mitgerissen wird. Etwa der gleiche Druck wirkt auf alle Wände und das Dach ein.

3.49 Die oben beschriebene Entwicklung ist in vereinfachter Form in Bild 3.49 veranschaulicht[2]). Die Abbildung zeigt den Grundriß eines Gebäudes, das von einer Luftdruckwelle (Machschen Welle) getroffen wird, welche sich in horizontaler Richtung bewegt. In Bild 3.49a sieht man, wie die Stoßfront sich rechtwinklig zur Stirnseite des dem Luftdruck ausgesetzten Bauwerks bewegt. In Bild 3.49b hat die Welle gerade die Vorderseite des Gebäudes erreicht, wobei sie einen hohen Überdruck erzeugt. In Bild 3.49c hat die Luftdruckwelle etwa den halben Weg am Gebäude entlang zurückgelegt, und in Bild 3.49d hat sie die Rückseite des Gebäudes erreicht. Der Druck an der Stirnseite ist etwas gefallen und steigt an den Seiten an, wenn die Luftdruckwelle das Gebäude umschließt. Wenn schließlich – wie in Bild 3.49e – die Stoßfront vorüber ist, wirken etwa gleiche Luftdrücke auf alle Wände und das Dach

[1]) Dies wird oft »seitlicher Überdruck« genannt, da er der gleiche ist wie der auf die Seite des Bauwerks einwirkende, wobei in dem hier angeführten Falle keine nennenswerte Reflexion vorhanden ist.

[2]) in Kapitel VI ausführlicher behandelt.

des Gebäudes ein. Liegt das Gebäude in einem Winkel zur Luftdruckwelle, so wirkt der Druck unmittelbar auf zwei Flächen anstatt auf eine, jedoch würde das Gesamtverhalten des Gebäudes das gleiche sein wie vorstehend beschrieben (Bild 3.49 f, g, h, i).

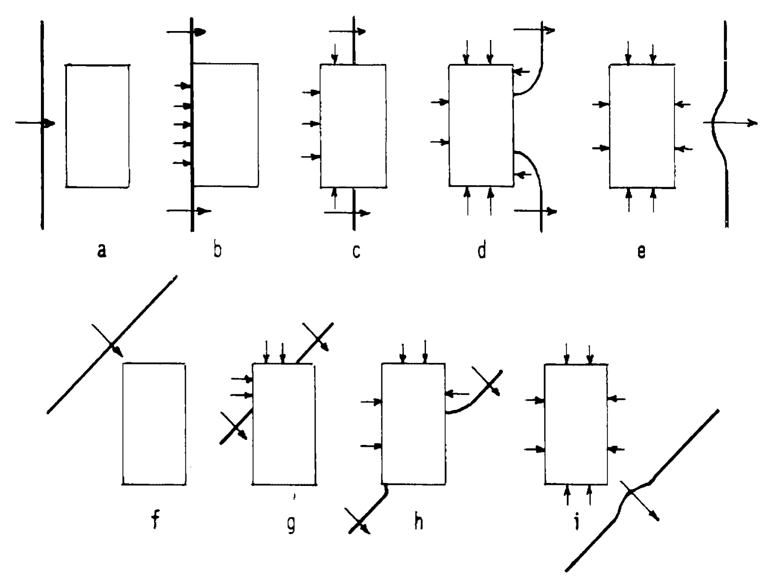


Bild 3.49 Die Stadien der Beugung einer Luftdruckwelle durch ein Bauwerk

3.50 Wenn die Luftdruckwelle das Gebäude noch nicht gänzlich umflossen hat, ist zwischen der Stirnseite und der Rückseite des Gebäudes ein erheblicher Druckunterschied vorhanden. Dieser Druckunterschied erzeugt eine seitlich wirkende (oder Bewegungs-)Kraft, welche bewirkt, daß das Gebäude sich in der gleichen Richtung bewegt wie die Luftdruckwelle. Diese Kraft ist als »Beugungsdruckbeanspruchung« bekannt, da sie einwirkt, während die Luftdruckwelle am Gebäude gebeugt wird. Das Ausmaß und die Art der Bewegung des Gebäudes hängt von der Größe, der Form und dem Gewicht des Gebäudes sowie von der Festigkeit seiner Verankerung im Erdboden ab. Bei der Ermittlung der Reaktion des Gebäudes sind, wie wir weiter unten sehen werden, noch weitere Merkmale von Bedeutung.

3.51 Hat die Luftdruckwelle das Bauwerk umschlossen (Bild 3.49 e oder Bild 3.49 i), dann ist der Druckunterschied fast auf null abgesunken, weil der Druck jetzt ungefähr auf allen Seiten gleich ist. Da jedoch diese Drücke noch über dem umgebenden atmosphärischen Druck bleiben, bis die positive Phase der Stoßwelle vorüber ist, wird die Beugungsdruckbeanspruchung durch einen nach innen gerichteten Druck, d. h. eine Kompressions- oder Quetschwirkung, ersetzt. Bei einem Gebäude ohne Öffnungen hört diese Kraft erst auf, wenn der Überdruck auf null abgesunken ist.

3.52 Die während des Stadiums der Beugungsdruckbeanspruchung verursachten Schäden werden durch die Größe der Belastung und ihre Dauer bestimmt. Die Belastung steht in Beziehung zur Überdruckspitze in der Luftdruckwelle; dies ist also ein wichtiger Faktor. Wenn das betreffende Bauwerk keine Öffnungen hat, was bisher angenommen wurde, entspricht die Dauer der Belastung ungefähr der Zeit, die für die Bewegung der Stoßfront von der Vorder- zur Rückseite des Gebäudes erforderlich ist. Die Größe des Bauwerks beeinflußt also die Beugungsdruckbeanspruchung. Bei einem Gebäude von etwa 23 m Länge wirkt die Beugungsdruckbeanspruchung eine zehntel Sekunde lang ein. Bei schlanken Bauten, z. B. Telegraphenmasten und Schornsteinen, ist die Beugungsdruckperiode so kurz, daß die diesbezügliche Belastung unbedeutend ist.

3.53 Hat das der Luftdruckwelle ausgesetzte Gebäude Öffnungen, oder hat es Fenster, Platten, leichte Seitenverkleidungen oder Türen, die innerhalb kurzer Zeit zerstört werden, so erfolgt sehr rasch ein Druckausgleich zwischen dem Inneren und dem Äußeren des Gebäudes. Dadurch wird der Druckunterschied verringert, während die Beugungsdruckbeanspruchung einwirkt. Die Beugungsdruckbeanspruchung des Gebäudes als Ganzes wird also verringert, obwohl die Last auf die Innen- und Zwischenwände größer ist als bei einem im wesentlichen geschlossenen Bauwerk, d. h. einem Bauwerk mit nur wenigen Öffnungen. Ferner wird, wenn das Gebäude nach dem Stadium der Beugungsdruckbeanspruchung viele Öffnungen aufweist, die anschließende Quetschwirkung, die darauf beruht, daß der Druck außen stärker als innen ist, nicht auftreten.

Belastung durch Winddruck (dynamischer Druck)

3.54 Während der ganzen Dauer der positiven Phase der Luftdruckwelle (und noch kurze Zeit danach) ist das Bauwerk der dynamischen Druckbeanspruchung oder dem Winddruck unterworfen, der durch die starken vorübergehenden Luftströmungen hinter der Stoßfront verursacht wird. Wie die Beugungsdruckbeanspruchung entspricht die Winddruckbelastung, insbesondere im Machschen Bereich, einer seitlich wirkenden (oder translatorischen) Kraft, die auf das dem Luftstoß ausgesetzte Gebäude oder Objekt einwirkt.

3.55 Außer bei sehr starken Stößen ist der dynamische Druck an der Stirnseite eines Gebäudes viel niedriger als die Überdruckspitze auf Grund der Luftdruckwelle und ihrer Reflexion (Tabelle 3.11). Jedoch kann der Winddruck auf das Gebäude im Vergleich zur Beugungsdruckbeanspruchung verhältnismäßig lange Zeit andauern. In Abschn. 3.15 ist gesagt, daß die Dauer der positiven Phase der Luftdruckwelle aus der Explosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers bei einer Entfernung von etwa 1,5 km etwa 2 Sekunden beträgt. Andererseits wirkt die Beugungsdruckbeanspruchung selbst bei großen Bauwerken nur einen kleinen Bruchteil einer Sekunde ein.

3.56 Die Wirkung des Winddruckes auf Bauten begründet einen bedeutenden Unterschied zwischen Kern- und Sprengstoffexplosionen. Bei gleicher Überdruckspitze in der Luftdruckwelle erweist sich ein Atomsprengkörper zerstörender als

ein herkömmlicher Sprengkörper, insbesondere bei Bauten, die auf Winddruck reagieren. Der Grund hierfür ist, daß die Luftdruckwelle bei einem herkömmlichen Sprengkörper von viel kürzerer Dauer ist, z. B. wenige Millisekunden. Wegen der größeren Länge der positiven Phase der Luftdruckwelle aus Kernwaffen von hohem Explosionswert verursachen solche Waffen größere Zerstörungen, als aus der Überdruckspitze allein zu erwarten wäre.

Bauliche Merkmale und Luftdruckbelastung

3.57 Bei der Analyse der Reaktion auf die Luftdruckbelastung entweder quantitativer Art durch Anwendung mathematischer Verfahren (s. Kap. VI) oder qualitativer Art, wie hier angewandt, ist es zweckmäßig, die Bauten in zwei Kategorien einzuteilen, d. h. in druckbeanspruchte und widerstandsbeanspruchte Bauten. Wie aus diesen Bezeichnungen hervorgeht, würden bei einer Kernexplosion die ersteren hauptsächlich durch die Druckbeanspruchung während der Beugungsphase und die letzteren durch den Winddruck (Strömungswiderstand) betroffen werden. Es muß jedoch betont werden, daß dieser Unterschied nur deshalb gemacht wird, um die Darstellung der in Wirklichkeit sehr komplizierten Verhältnisse zu vereinfachen. Wenn es auch zutrifft, daß manche Bauten hauptsächlich auf Druckkräfte und andere hauptsächlich auf Widerstandskräfte reagieren, so reagieren doch alle Bauten auf beide Beanspruchungen. Die relative Bedeutung der einzelnen Beanspruchungsart für die Entstehung von Schäden hängt von der Art des Bauwerks sowie von den Merkmalen der Luftdruckwelle ab. Diese Tatsachen müssen bei der nachstehenden Abhandlung berücksichtigt werden.

3.58 Große Bauten mit ziemlich kleinen Fenster- und Türflächen und ziemlich starken Außenwänden reagieren hauptsächlich auf Druckbeanspruchung bei der Beugung. Der Grund dafür ist, daß die Luftdruckwelle ziemlich viel Zeit braucht, um das Gebäude zu umschließen. Der Druckunterschied zwischen Stirn- und Rückseite des Gebäudes ist während dieser ganzen Zeitdauer vorhanden. Auf Beugungsdruckbeanspruchung reagieren hauptsächlich Hochbauten, Stahlbetonbauten mit kleinen Fensterflächen, große wandtragende Konstruktionen (z. B. Etagenwohnhäuser) und Fachwerkbauten, wie z. B. Wohnhäuser.

3.59 Da selbst bei großen Bauten die Druckbeanspruchung in der Beugungsphase gewöhnlich während eines Bruchteils der Dauer der Luftdruckwelle einwirkt, hat die Länge der Zeitdauer der Luftdruckwelle keine nennenswerte Auswirkung. Mit anderen Worten: eine Luftdruckwelle von längerer Dauer beeinflußt während des Stadiums der Beugungsdruckbeanspruchung die Stärke der seitlichen Belastung (oder den entstehenden Schaden) nicht wesentlich. Ein Bauwerk, das hauptsächlich auf Beugungsdruckbeanspruchung reagiert, ist deshalb vor allem gegen die Überdruckspitze in der Stoßwelle, der es ausgesetzt ist, empfindlich. Eigentlich bestimmt der reflektierte Überdruck auf das Gebäude die Beugungsdruckbeanspruchung, und dieser kann das Mehrfache des Überdruckes der einfallenden Welle betragen (s. Abschnitt 3.81).

3.60 Wenn die Drücke auf verschiedene Flächen eines Gebäudes (oder von Bauelementen) rasch ausgeglichen werden, entweder wegen der geringen Größe oder wegen der Merkmale des Bauwerks (oder Bauelementes) oder wegen der raschen Bildung zahlreicher Öffnungen durch den Luftdruck, dann wirken die Beugungskräfte nur sehr kurze Zeit ein. Das Bauwerk reagiert dann hauptsächlich auf Grund des dynamischen Druckes (oder der Winddruckbeanspruchung) des Luftstoßes. Bauten, die hauptsächlich auf Widerstandsbeanspruchung reagieren, sind Schornsteine, Telegraphenmasten, Radio- und Fernsehsendetürme, elektrische Leitungstürme und Fachwerkbrücken. In all diesen Fällen erfordert die Ablenkung der Stoßwelle um das Gebäude (oder seine Bauelemente) herum eine so kurze Zeitspanne, daß der Beugungsvorgang unbedeutend ist; die Beanspruchung durch den Strömungswiderstand jedoch kann beträchtlich sein.

3.61 Der Winddruck auf ein Bauwerk wird nicht nur durch den dynamischen Druck bestimmt, sondern auch durch die Form des Bauwerks (oder Bauelementes). Der Formfaktor (oder Widerstandsbeiwert) ist bei abgerundeten oder stromlinienförmigen Objekten geringer als bei unregelmäßigen oder scharfkantigen Bauten oder Elementen. So ist z. B. die Beanspruchung je Flächeneinheit eines Telegraphenmastes oder eines Schornsteins nicht so groß wie bei einem I-Träger.

3.62 Stahl- (oder Stahlbeton-)Gerippebauten mit leichten Wänden aus Asbestzement, Aluminium oder Wellblech werden rasch widerstandsempfindlich, weil die Wände bei geringen Überdrücken schon einstürzen. Dieses Einstürzen tritt – zusammen mit dem Druckausgleich – sehr bald ein, nachdem die Luftdruckwelle auf das Gebäude auftrifft, so daß das Gerippe einer verhältnismäßig geringen Beugungsdruckbeanspruchung ausgesetzt ist. Die dann folgende Zerstörung oder Beschädigung des Gerippes sowie kleiner Bauelemente, z. B. Säulen, Balken und Binder, wird dann durch die Winddruckkräfte verursacht.

3.63 Bei Bauten, die hauptsächlich auf Strömungswiderstand reagieren oder durch die Einwirkung des Luftdruckes rasch empfindlich gegen Winddruck werden, wird die Reaktion des Bauwerks oder seiner Bauelemente sowohl durch die Widerstandsbelastung als auch durch deren Dauer bestimmt. Somit hängt die Beschädigung von der Länge der positiven Phase der Luftdruckwelle sowie von den Überdrücken ab, die mit den dynamischen Drücken zusammenhängen. Infolgedessen verursacht bei einer gegebenen Überdruckspitze ein Atomsprengkörper von hohem Explosionswert mehr Schäden an einem gegen Winddruck empfindlichen Bauwerk als ein Atomsprengkörper von geringerem Explosionswert, weil im ersteren Falle die Dauer der positiven Phase größer ist.

Die baulichen Schadensbereiche: Umrechnungsregeln

3.64 Der Bereich (oder die Fläche), auf den sich bauliche Schäden bestimmter Art erstrecken, hängt natürlich vom Explosionswert und der Art (und Höhe) der Explosion ab. Wie aus dem mehr technischen Teil dieses Kapitels hervorgeht (Abschnitt 3.78ff.), gibt es Umrechnungsregeln, welche die Entfernung, in der eine ge-

gebene Überdruckspitze in der Luftdruckwelle erreicht wird, zum Explosionswert in Beziehung setzen. Bei Bauten, die hauptsächlich während der Beugungsphase beschädigt werden, in welcher der Überdruck den wichtigen Faktor für die Ermittlung der Reaktion auf den Luftdruck darstellt, kann deshalb die Auswirkung des Explosionswertes des Atomsprengkörpers auf den Bereich (oder die Fläche), auf den sich eine bestimmte Art von Beschädigung erstreckt, rasch errechnet werden.

3.65 Wenn wir in dem in Abschn. 3.27 erwähnten Sinne gleiche Explosionshöhen annehmen (s. auch Abschn. 3.87), so nimmt eine bestimmte Schadensentfernung – bei einem hauptsächlich gegen Druckbeanspruchung bei der Beugung empfindlichen Bauwerk – proportional der Kubikwurzel des Explosionswertes zu, und die Schadensfläche nimmt proportional der Potenz 2/3 zu. Das bedeutet z. B., daß eine tausendfache Steigerung des Explosionswertes die Entfernung einer bestimmten Art von Druckschaden um einen Faktor von etwa 10 vergrößert; die Schadensfläche wird um einen Faktor von etwa 100 vergrößert.

3.66 Wenn der Schaden weitgehend von der Widerstandsbeanspruchung während der ganzen positiven Luftdruckphase abhängt, ist die Länge dieser Phase – außer der Überdruckspitze – bedeutend. Je größer der Explosionswert des Atomsprengkörpers, um so größer ist die Entfernung von der Explosion, bei welcher die Überdruckspitze einen bestimmten Wert hat, und desto länger ist die Dauer der positiven Phase dieses Überdruckes. Da bei einem gegebenen Druck der durch Widerstandsbeanspruchung entstehende Schaden mit zunehmender Dauer größer wird, entsteht der gleiche Schaden auch bei geringeren Überdrücken. Bauten, die gegen Winddruck empfindlich sind, werden deshalb in einem Bereich beschädigt, der größer ist als der nach der Regel der Kubikwurzel bei druckempfindlichen Bauten angegebene Bereich. Mit anderen Worten: bei tausendfachem Explosionswert eines Atomsprengkörpers nehmen die Entfernung einer bestimmten Beschädigung von widerstandsempfindlichen Bauten um einen Faktor von mehr als 10 und die Fläche um einen Faktor von mehr als 100 zu.

Faktoren, die die Reaktion beeinflussen

Festigkeit und Masse

3.67 Zahlreiche Faktoren, die mit den Merkmalen eines Bauwerks im Zusammenhang stehen, beeinflussen die Reaktion auf die Luftdruckwelle bei einer Kernexplosion. Zu den hier erörterten Faktoren gehören die Festigkeit und die Masse eines Bauwerks, die gesamte Konstruktion und das Dehnungsvermögen der Baustoffe und Bauteile.

3.68 Das Hauptmerkmal für die Ermittlung der Reaktion eines Bauwerks auf den Luftdruck ist die Festigkeit. Der hier angewandte Begriff »Festigkeit« ist eine

allgemeine Bezeichnung, denn sie bedeutet eine Eigenschaft, die von vielen Faktoren beeinflußt wird, von denen einige erkennbar sind, andere nicht. Das deutlichste Merkmal der Festigkeit ist natürlich die massive Bauart; diese ist aber auf Grund anderer, nicht unmittelbar dem Auge sichtbarer Faktoren, z. B. des Federungsvermögens und der Verformbarkeit des Gerippes, der Stärke der Balken- und Winkelstöße, der überzähligen Stützen und der Anzahl der Diagonalverstrebungen in dem Bauwerk unterschiedlich. Einige dieser Faktoren sind nachstehend näher erörtert.

3.69 Die stabilsten Bauwerke sind Schwergerippebauten aus Stahl und Stahlbeton, während die am wenigsten widerstandsfähigen Bauwerke wahrscheinlich hallenförmige Industriebauten mit Leichtgerippe und großer Spannweite sind. Manche Arten leichter Gerippekonstruktionen fallen ebenfalls unter diese Kategorie, jedoch haben gut konstruierte Gerippebauwerke eine höhere Widerstandsfähigkeit.

3.70 Die Widerstandsfähigkeit gegen Luftdruck ist bei Bauten mit tragenden Mauerwerkswänden, z. B. aus Ziegelstein oder Betonblocksteinen ohne Bewehrung, nicht groß. Das liegt an dem mangelnden Federungsvermögen und an der geringen Festigkeit der Verbindungen, die einer Zugbeanspruchung ausgesetzt sind, wenn die Luftdruckbelastung seitlich auf das Gebäude einwirkt. Die Verwendung von Stahlbewehrungen erhöht bei Bauwerken dieser Art die Widerstandsfähigkeit sehr, wie wir noch weiter unten sehen werden.

Bauliche Konstruktion

3.71 Mit Ausnahme derjenigen Gebiete, in denen mit ziemlich starken Erdbebenstößen zu rechnen ist, sind die meisten Bauwerke in den Vereinigten Staaten so konstruiert, daß sie den seitlichen Belastungen nur mittelmäßig starker Winde standhalten. Für Konstruktionszwecke wird diese Belastung als statische (oder ständige) Belastung angenommen, da die natürlichen Winde sich verhältnismäßig langsam bilden und ziemlich gleichbleibend sind. Der Luftdruck einer Kernexplosion jedoch verursacht eher eine seitliche dynamische als eine statische Belastung; die Last wirkt außerordentlich rasch ein und dauert eine Sekunde oder länger bei ständig abnehmender Stärke. Die durch die Masse des Bauwerks oder Bauteils gegebene Trägheit ist ein bedeutender Faktor für die Bestimmung der Reaktion auf dynamische seitliche Belastung, obwohl sie für die statische Belastung nicht bedeutend ist.

3.72 Von allen Bauwerken werden diejenigen, die erdbebensicher sein sollen, d. h. die einer seitlichen Belastung von etwa 10% ihres Gewichts standhalten können, wahrscheinlich durch den Luftdruck am wenigsten beschädigt. Solche Bauten, die durch Zwischenwände versteift sind und durchgehende Fugenverbindung haben, die eine zusätzliche Biegefestigkeit verleiht, werden größere seitliche Kräfte ohne ernsthafte Beschädigung aushalten können.

Verformbarkeit

3.73 Der Begriff Verformbarkeit bezieht sich auf die Fähigkeit eines Baustoffes oder Bauwerkes, Energie unelastisch zu absorbieren, ohne zu versagen; mit anderen Worten: je größer die Verformbarkeit, um so größer die Widerstandsfähigkeit gegen Versagen. Spröde Baustoffe haben nur geringe Verformbarkeit und versagen leicht.

3.74 Es werden hier zwei Grundbegriffe der Verformbarkeit erörtert. Wenn eine Kraft (oder Last) auf ein Material einwirkt, so daß es verformt wird, wie dies z. B. bei einer Kernexplosion der Fall ist, so nennt man die anfängliche Verformung die »elastische«. Befindet sich das Material noch im elastischen Bereich, so gewinnt es seine ursprüngliche Form wieder, wenn die Belastung aufhört. Ist jedoch die durch die Last erzeugte Spannung stark genug, so kommt das Material in den »plastischen« Bereich. In diesem Zustand gewinnt es nach Beendigung der Spannungsbeanspruchung seine ursprüngliche Form nicht wieder, d. h. die Verformung ist bleibend, jedoch erfolgt kein Versagen. Nur wenn die Spannung die »Bruchgrenze« erreicht, tritt ein Versagen, d. h. ein Bruch, ein.

3.75 Ideal gesehen müßte ein Bauwerk, das durch Luftdruck nur wenig beschädigt werden soll, eine möglichst große Elastizität aufweisen. Leider sind aber Baustoffe im allgemeinen nicht imstande, im elastischen Bereich viel Energie zu absorbieren, obwohl viele der üblichen Baustoffe im plastischen Bereich große Energiemengen aufnehmen können, bevor sie versagen. Das Problem bei luftstoßsicherer Konstruktion liegt deshalb darin zu entscheiden, wieviel bleibende (plastische) Verformung zulässig ist, bevor ein bestimmtes Bauwerk unbrauchbar wird. Dies hängt natürlich von der Art und dem Zweck des Bauwerks ab. Obwohl eine Verformung bis zum Einsturz auf jeden Fall unerwünscht ist, kann es sein, daß manche geringen Verformungen die laufende Benutzung des Bauwerks nicht wesentlich beeinträchtigen.

3.76 Es ist klar, daß die Verformbarkeit eine wünschenswerte Eigenschaft von Baustoffen ist, die luftstoßsicher sein sollen. Stahl und Stahlbewehrungen besitzen diese Eigenschaft in großem Maße. Sie können große Energiemengen, z. B. aus einer Luftdruckwelle, absorbieren, ohne zu versagen, und damit die Möglichkeit des Einsturzes des Bauwerks, in dem sie verwendet sind, verringern. Stahl hat den weiteren Vorteil, daß er bei dynamischer Belastung eine höhere Streckgrenze (oder Elastizitätsgrenze) hat als bei statischer Belastung.

3.77 Obwohl Beton allein nicht verformbar ist, wenn – wie bei Stahlbetonbauten – Stahl und Beton zusammen verwendet werden, wird im allgemeinen die Dehnungseigenschaft des Stahls maßgebend sein. Das Bauwerk weist dann eine beträchtliche Verformbarkeit auf und ist damit ziemlich luftstoßsicher. Ohne Bewehrung sind Mauerwerkswände überhaupt nicht verformbar und gehen, wie oben gesagt, sofort zu Bruch.

Die technischen Grundlagen der Erscheinungen der Luftdruckwelle[1])

Eigenschaften der Luftdruckwelle an der Erdoberfläche

3.78 In den ersten Teilen dieses Kapitels sind die Merkmale der Luftdruckwelle in qualitativer Art und Weise behandelt worden; die restlichen Abschnitte werden der Betrachtung einiger quantitativer Gesichtspunkte der Erscheinungen einer Stoßwelle in der Luft gewidmet[2]). Die grundlegenden Beziehungen zwischen den Eigenschaften einer Luftdruckwelle, die eine steile Front hat, an der ein plötzlicher Drucksprung erfolgt, sind von den Rankine-Hugoniot-Bedingungen abgeleitet, die auf der Erhaltung der Masse, der Energie und des Impulses an der Stoßfront basieren. Diese Bedingungen, zusammen mit der Zustandsgleichung für Luft, ermöglichen die Ableitung der erforderlichen Beziehungen im Zusammenhang mit der Stoßwellengeschwindigkeit, der Teilchen- (oder Wind-)Geschwindigkeit, dem Überdruck, dem dynamischen Druck und der Luftdichte hinter der idealen Stoßfront.

3.79 Die Eigenschaften der Luftdruckwelle im Bereich der regulären Reflexion sind etwas kompliziert und hängen vom Einfallswinkel der Welle zum Erdboden und der Stoßstärke ab. Bei Bodenexplosionen, wobei nur eine einzige halbkugelförmige Welle auftritt, wie in Abschn. 3.29 ausgeführt, und im Machschen Bereich unter dem Tripelpunktweg bei einer Luftexplosion werden die verschiedenen Daten der Luftdruckwelle an der Stoßfront lediglich durch die Rankine-Hugoniot-Gleichungen zueinander in Beziehung gebracht. Bei diesen Bedingungen, in denen es nur eine einzige Stoßfront gibt, sind die nachstehenden Ergebnisse anwendbar.

3.80 Die Stoßwellengeschwindigkeit U und die Teilchengeschwindigkeit (oder Spitzengeschwindigkeit des Windes hinter der Stoßfront) u werden ausgedrückt durch

$$U = c_0(1 + 6p/7P_0)^{1/2}$$

und

$$u = \frac{5p}{7P_0} \cdot \frac{c_0}{(1 + 6p/7P_0)^{1/2}}$$

Hierbei ist p die Überdruckspitze (hinter der Stoßfront), P_0 ist der umgebende Druck (vor dem Stoß), und c_0 ist die umgebende Schallgeschwindigkeit (vor dem Stoß). Die Luftdichte ϱ hinter der Stoßfront wird zu der umgebenden Dichte ϱ_0 in Beziehung gebracht durch

$$\frac{\varrho}{\varrho_0} = \frac{7 + 6p/P_0}{7 + p/P_0}$$

---

[1]) Die übrigen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

[2]) Die technischen Grundlagen der Luftstoßbelastung und der Reaktion von Bauten sowie andere einschlägige Themen sind in Kapitel VI behandelt.

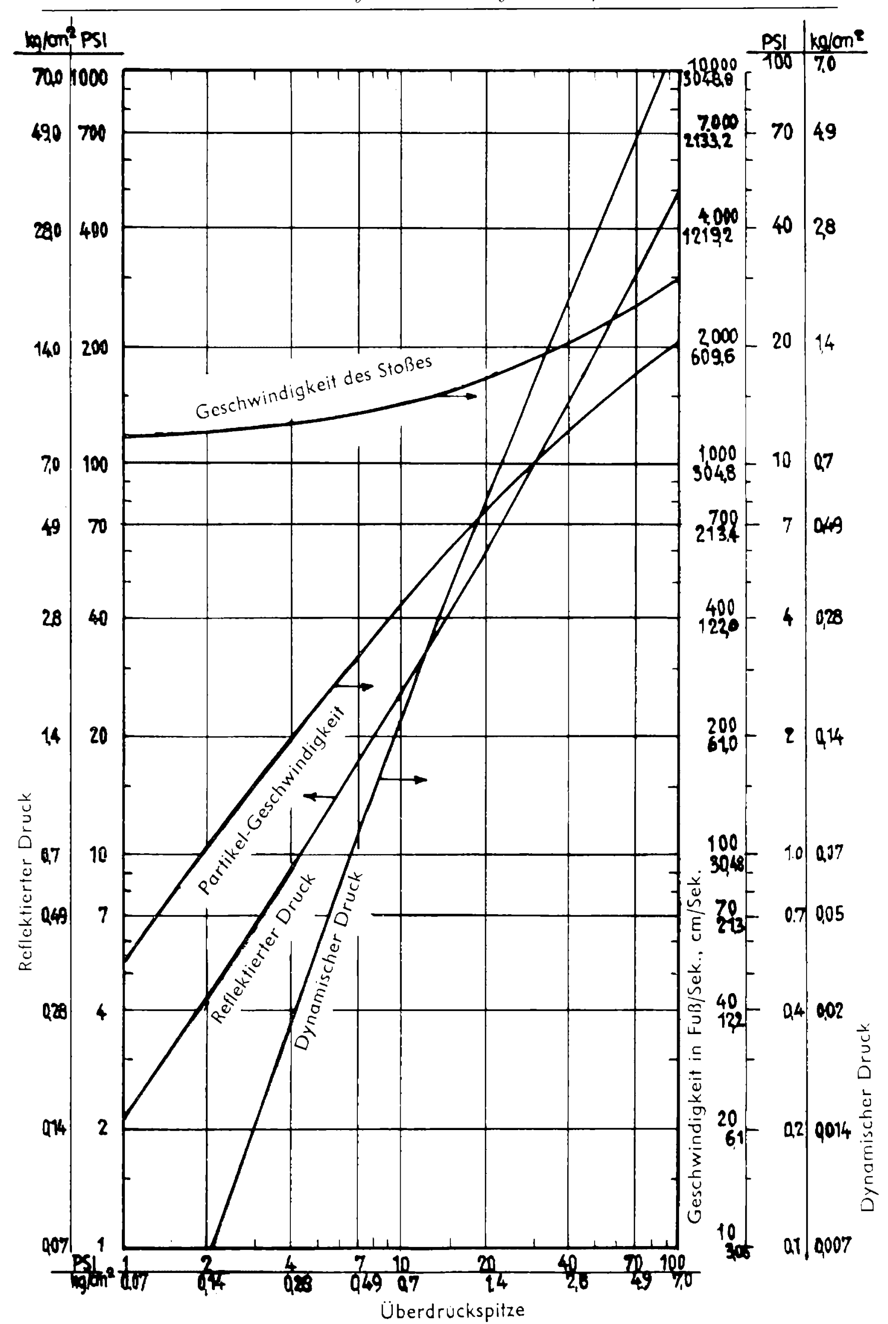


Bild 3.80 Beziehung zwischen den Daten der Luftdruckwelle an der Stoßfront und der Überdruckspitze

Der dynamische Druck q wird bestimmt durch

$$q = \tfrac{1}{2}\varrho u^2$$

und die Einsetzung der passenden Rankine-Hugoniot-Gleichungen ergibt für den dynamischen Spitzendruck

$$q = \frac{5}{2} \cdot \frac{p^2}{7P_0 + p}$$

Die Veränderungen der Stoßgeschwindigkeit, der Teilchengeschwindigkeit (oder Spitzengeschwindigkeit des Windes) und des dynamischen Drucks mit der Überdruckspitze in Meereshöhe sind in Bild 3.80 graphisch dargestellt, so wie sie aus den vorstehenden Gleichungen abgeleitet sind.

3.81 Wenn die Luftdruckwelle mit normalem Einfall, d. h. direkt von vorn, auf eine Fläche auftrifft, z. B. auf die Fläche eines Bauwerks, dann ist der Augenblickswert des reflektierten Überdruckes p_r gegeben durch

$$p_r = 2p\left(\frac{7P_0 + 4p}{7P_0 + p}\right) \tag{3.81.1}$$

Aus dieser Formel ist ersichtlich, daß der Wert von p_r bei hohen Werten des Einfallsüberdruckes (starken Stößen) sich $8p$ nähert und bei niedrigen Überdrücken (schwachen Stößen) sich $2p$ nähert. Bild 3.80 enthält eine Kurve, die die Veränderung des augenblicklichen reflektierten Druckes mit der einfallenden Überdruckspitze zeigt.

3.82 Die Gleichungen in Abschn. 3.80 geben die Maximalwerte der verschiedenen Luftdruckwellen-Parameter an der Stoßfront an. Wie wir bereits gesehen haben, nehmen jedoch der Überdruck sowie der dynamische Druck mit der Zeit ab, wenn auch in unterschiedlichem Verhältnis. In vielen Fällen kann die Veränderung des Überdruckes hinter der Stoßfront mit der Zeit an einem gegebenen Punkt durch folgende einfache empirische Gleichung dargestellt werden:

$$p(t) = p\left(1 - \frac{t}{t_+}\right)e^{-t/t_+} \tag{3.82.1}$$

Hierbei ist $p(t)$ der Überdruck zu irgendeinem Zeitpunkt t nach Ankunft der Stoßfront, p ist die Überdruckspitze und t_+ ist die Dauer der positiven Phase der Luftdruckwelle. Diese Formel ist in Bild 3.82 graphisch dargestellt; hier ist der »normalisierte« Überdruck, d. h. der auf die Überdruckspitze bezogene Wert, über der »normalisierten« Zeit, d. h. der auf die Dauer der positiven Phase bezogenen Zeit, aufgetragen. Es darf bemerkt werden, daß bei Einwirkung einer Luftdruckwelle auf ein Bauwerk diese Gleichung für die Bestimmung der Luftdruckbelastung angewandt wird.

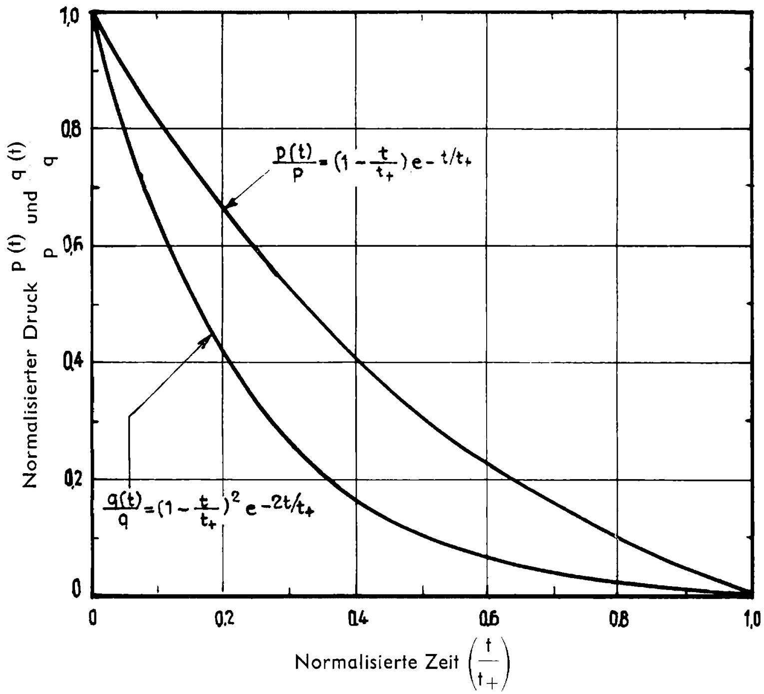


Bild 3.82 Normalisierter Überdruck und dynamischer Druck in Abhängigkeit von der normalisierten Zeit

3.83 Eine ähnliche empirische Formel für die Veränderung des dynamischen Druckes mit der Zeit hinter der Stoßfront ist

$$q(t) = q\left(1 - \frac{t}{t_+}\right)^2 e^{-2t/t_+}$$

Hierbei sind $q(t)$ der Wert des dynamischen Druckes zu einem beliebigen Zeitpunkt t nach Ankunft der Stoßfront und q der maximale dynamische Druck. Eine Darstellung dieser Gleichung ist in Bild 3.82 gegeben.

3.84 Ein weiterer wichtiger Parameter für den Luftdruckschaden ist der »Impuls«, der die Dauer der positiven Phase und die Veränderung des Überdruckes während dieser Zeit berücksichtigt. Der Impuls an einem gegebenen Ort kann definiert werden als der Flächeninhalt unter der Überdruck-Zeit-Kurve, wie sie in Bild 3.82 aufgezeichnet ist. Der Überdruckimpuls I der positiven Phase (je Flächeneinheit) kann dann mathematisch wie folgt dargestellt werden:

$$I = \int_0^{t_+} p(t)\,dt\,.$$

Hierbei kann $p(t)$ auf Wunsch analytisch mittels der Gleichung 3.82.1 ausgedrückt werden. Der dynamische Impuls der positiven Phase kann durch eine ähnliche Formel definiert werden, in der $q(t)$ an die Stelle von $p(t)$ gesetzt wird.

3.85 Um die charakteristischen Eigenschaften der Luftdruckwelle bei einer Explosion von gegebenem Explosionswert berechnen zu können, wenn die Merkmale für andere Energien bekannt sind, werden entsprechende Umrechnungsgesetze (Modellgesetze) angewandt. Mit Hilfe solcher Gesetze ist es möglich, die Meßwerte für einen weiten Energiebereich in einfacher Form auszudrücken. Dies kann, wie nachstehend veranschaulicht, dadurch geschehen, daß Kurven gezeichnet werden, aus denen hervorgeht, wie die verschiedenen Eigenschaften der Luftdruckwelle an der Oberfläche sich mit zunehmender Entfernung von der Explosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers verändern. Dann können mit Hilfe der Umrechnungsgesetze die Werte für eine Explosion irgendeines gegebenen Explosionswertes rasch ermittelt werden.

3.86 Theoretisch ergibt sich ein gegebener Druck in einer Entfernung von der Explosion, die proportional der Kubikwurzel des Explosionswertes des Atomsprengkörpers ist. Originalversuche haben gezeigt, daß dieses Verhältnis zwischen Entfernung und Explosionswert für Werte bis einschließlich des Megatonnenbereiches gilt. Deshalb kann die Berechnung mit der Kubikwurzel ruhig für einen großen Bereich von Explosionswerten angewandt werden. Wenn D_0 die Entfernung (oder Schrägentfernung) von einer Bezugsexplosion von W_0 kt ist, in welcher ein bestimmter Überdruck oder dynamischer Druck erreicht wird, treten nach diesem Gesetz bei einem Explosionswert von W kt die gleichen Drücke in einer Entfernung D auf, die gegeben ist durch

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{W}{W_0}\right)^{1/3} \tag{3.86.1}$$

Wie vorstehend ausgeführt, ist die Bezugsexplosion zweckdienlicherweise mit einem Explosionswert von 1 kt gewählt worden, so daß $W_0 = 1$ ist. Nach Gleichung 3.86.1 ist deshalb

$$D = D_0 \times W^{1/3} \tag{3.86.2}$$

wobei D_0 sich auf die Entfernung von einer 1-kt-Explosion bezieht.

Danach kann, wenn die Entfernung D gegeben ist, der Explosionswert W, der zur Erzielung einer bestimmten Wirkung erforderlich ist, z. B. zur Erzielung einer gegebenen Überdruckspitze, errechnet werden; oder aber es kann, wenn der Explosionswert W gegeben ist, die entsprechende Entfernung D aus der Gleichung 3.86.2 ermittelt werden.

3.87 Beim Vergleich von Luftexplosionen verschiedener Explosionswerte ist es zweckmäßig, eine umgerechnete Explosionshöhe einzusetzen, die gegeben wird als

$$\text{umgerechnete Explosionshöhe} = \frac{\text{tatsächliche Explosionshöhe}}{W^{1/3}}$$

Wir sehen also, daß bei Explosionen verschiedener Explosionswerte in gleicher umgerechneter Explosionshöhe das Umrechnungsgesetz der Kubikwurzel für Entfernungen vom Nullpunkt sowie für Entfernungen von der Explosion angewandt werden kann. Wenn also d_0 die Entfernung vom Nullpunkt ist, in welcher bei einer 1-kt-Explosion ein bestimmter Überdruck oder dynamischer Druck auftritt, dann wird bei Explosion von W kt der gleiche Druck in einer Entfernung d festgestellt, die ermittelt wird durch die Beziehung

$$d = d_0 \times W^{1/3} \qquad (3.87.1)$$

Diese Formel kann für Berechnungen der im vorstehenden Abschnitt erwähnten Art angewandt werden, nur gelten die betreffenden Entfernungen vom Nullpunkt aus anstatt vom Explosionspunkt (Schrägentfernungen).

3.88 Die Umrechnung mit der Kubikwurzel kann auch für die Ankunftszeit der Stoßfront, die Dauer der positiven Phase und den Impuls angewandt werden mit der Maßgabe, daß die betreffenden Größen selbst nach dem Kubikwurzelgesetz umgerechnet werden. Das Verhältnis kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{d}{d_0} = \left(\frac{W}{W_0}\right)^{1/3} \text{ und } \frac{I}{I_0} = \frac{d}{d_0} = \left(\frac{W}{W_0}\right)^{1/3}$$

wobei t_0 die Ankunftszeit oder die Dauer der positiven Phase und I_0 der Impuls bei einer Bezugsexplosion von einem Explosionswert W_0 ist. t und I beziehen sich auf Explosionen mit dem Explosionswert W; wie vorher sind d_0 und d Entfernungen vom Nullpunkt. Wenn wir W_0 mit 1 kt annehmen, dann werden die einzelnen Größen wie folgt hierzu in Beziehung gesetzt:

$$t = t_0 \times W^{1/3} \text{ in einer Entfernung } d = d_0 \times W^{1/3}$$

und

$$I = I_0 \times W^{1/3} \text{ in einer Entfernung } d = d_0 \times W^{1/3}$$

Beispiele für die Anwendung der oben angeführten Gleichungen sind weiter unten gegeben.

Höhenkorrekturen

3.89 Die vorstehenden Gleichungen gelten für eine völlig homogene Atmosphäre, d. h. eine Atmosphäre, in der der umgebende Druck und die Temperatur am Explosionspunkt und Ziel in allen Fällen gleich sind. Sind die Umgebungsverhältnisse bei einer bestimmten Explosion im Vergleich zu denen der Bezugsexplosion wesentlich verschieden, dann müssen die in Abschn. 3.39 erwähnten Korrekturfaktoren angewandt werden. Die allgemeinen Beziehungen, die die Möglichkeit berücksichtigen, daß die absolute Temperatur T und der umgebende Druck P nicht die gleichen sind wie T_0 bzw. P_0, lauten bei der Bezugs-(1-kt-)Explosion wie folgt:

für den Überdruck: $p = p_0 \dfrac{P}{P_0}$

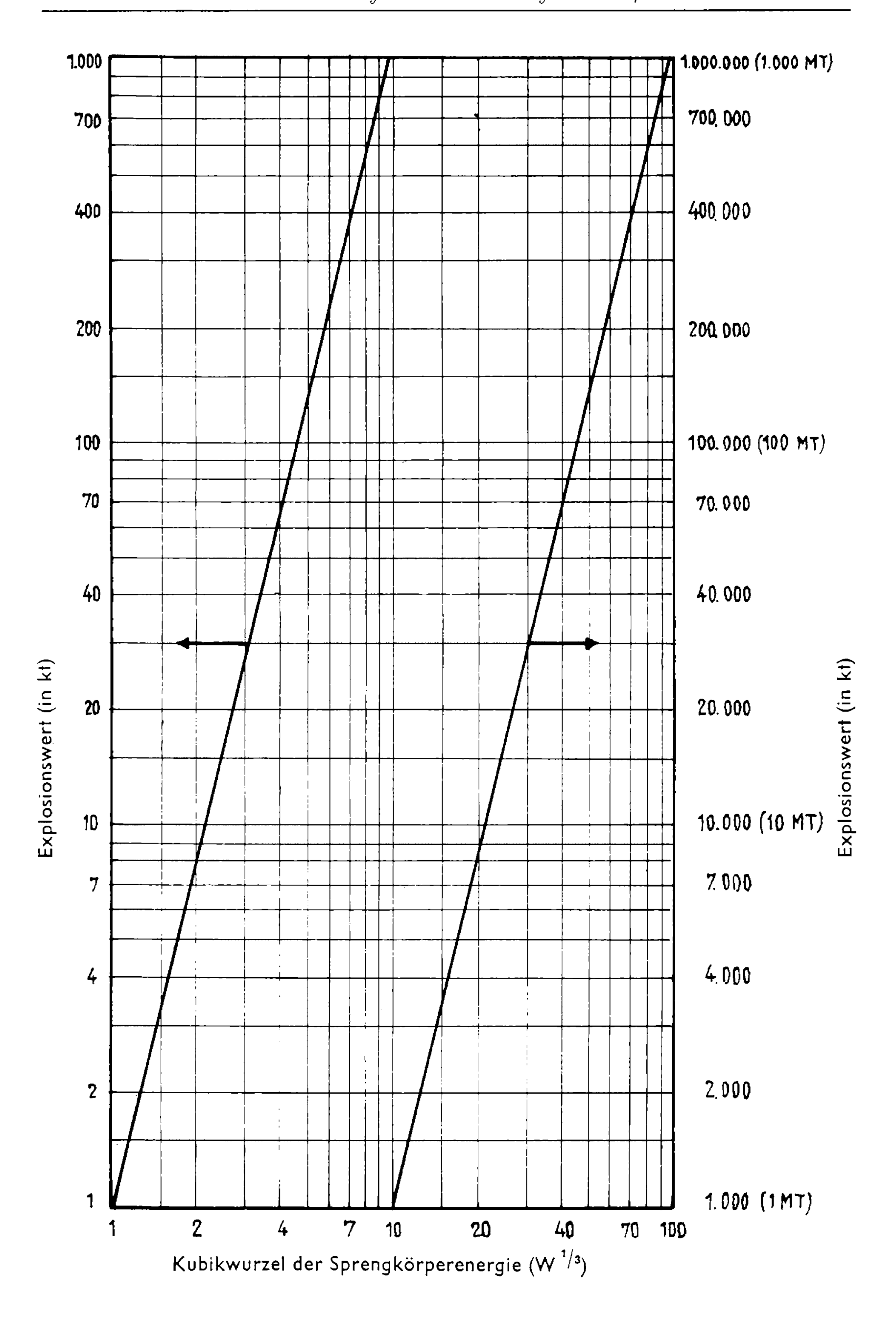


Bild 3.93 · Kubikwurzeln der Werte für den Explosionswert

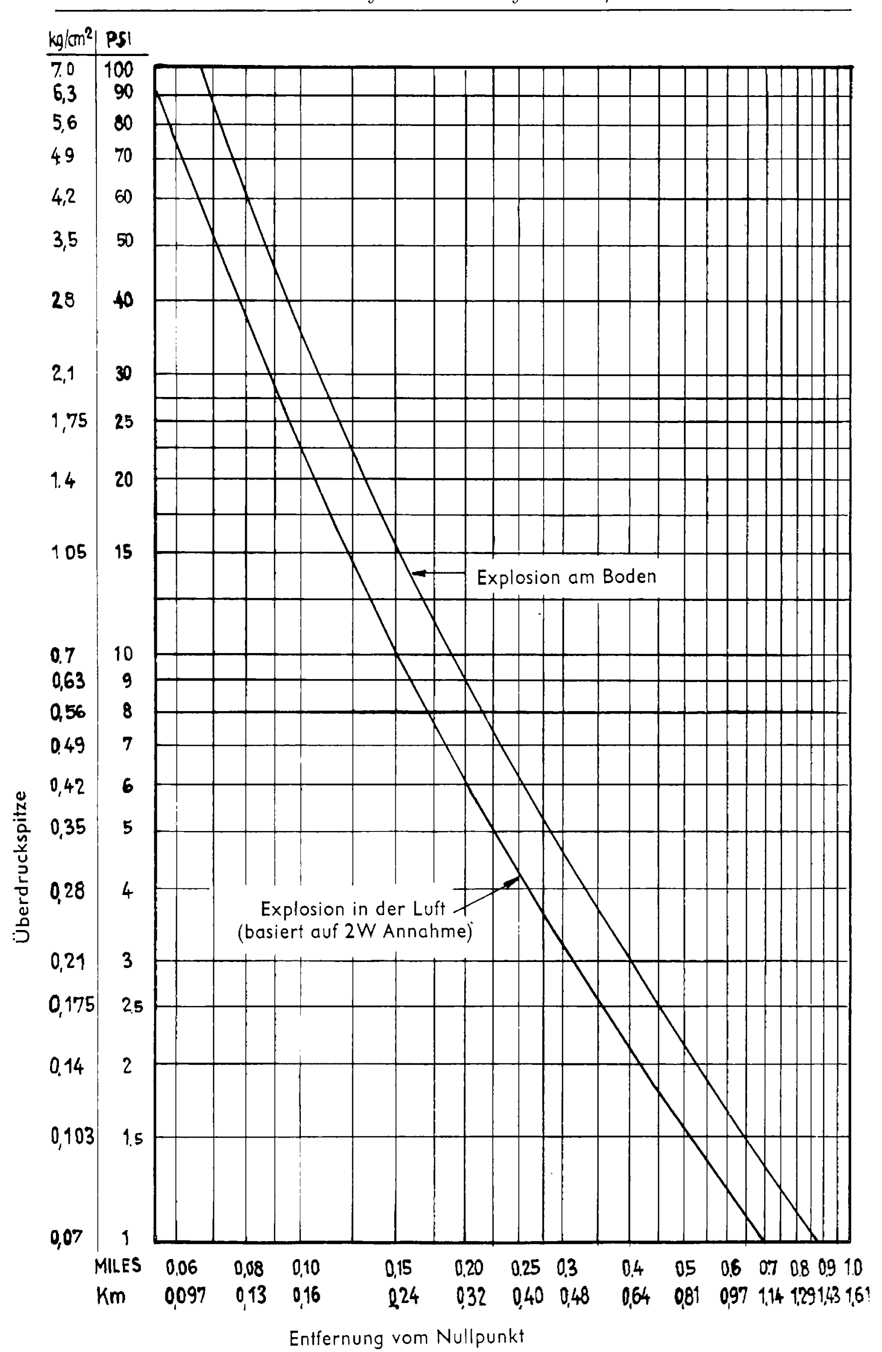


Bild 3.94a Überdruckspitze bei einer 1-kt-Boden- bzw. -Luftexplosion

wobei p sich jedesmal auf den entsprechenden Überdruck in einer gegebenen Entfernung bezieht. Die berichtigten Entfernungswerte für einen bestimmten Druck sind dann gegeben durch

$$d = d_0 W^{1/3} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/3}$$

und für die Ankunftszeit oder die Dauer der positiven Phase in entsprechender umgerechneter Entfernung sind sie gegeben durch

$$t = t_0 W^{1/3} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/3} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}$$

3.90 Wir sehen: wenn $T = T_0$ und $P = P_0$ ist, werden diese Formeln identisch mit den entsprechenden Formeln in Abschn. 3.86 und 3.87 bei völlig homogenen Bedingungen. In der Regel gelten die Bezugswerte für die Eigenschaften der Luftdruckwelle – wie z. B. die hier kurz angeführten – für normale atmosphärische Verhältnisse in Meereshöhe, wobei $P_0 = 1$ kg/cm² und die Temperatur 15° C beträgt, so daß $T_0 = 519°$ Rankine oder 288° Kelvin ist. Wie vorstehend in Abschn. 3.39 gesagt, betragen diese Korrekturen bei Explosionen in Höhen bis zu etwa 1500 m nur einige Prozent.

Standardkurven und -berechnungen der Eigenschaften der Luftdruckwelle

3.91 Um die in einem bestimmten Bereich von einer gegebenen Explosion zu erwartenden Schäden schätzen zu können, müssen die Daten der Luftdruckwelle, die sich mit der Zeit und der Entfernung ändern, definiert werden. Deshalb sind hier zur Ergänzung der obigen Abhandlung Standardkurven für die verschiedenen Eigenschaften der Luftdruckwelle gegeben. Diese Kurven zeigen die Veränderung der Überdruckspitze, des dynamischen Spitzendruckes, der Ankunftszeit, der Dauer der positiven Phase und des Überdruckimpulses mit der Entfernung vom Nullpunkt bei Boden- und Luftexplosionen. Im Falle der Luftexplosion ist auch eine Kurve gegeben, die den Weg des Tripelpunktes, d. h. die Höhe des Machschen Stammes als Funktion der Entfernung vom Nullpunkt zeigt.

3.92 Nach diesen Kurven können die Werte für die Eigenschaften der Luftdruckwelle an der Erdoberfläche berechnet werden; die Ergebnisse können dazu benutzt werden, um die Belastung und Reaktion eines bestimmten Zieles zu ermitteln. Zu erwähnen ist, daß die Meßwerte das Verhalten der Luftdruckwelle unter durchschnittlichen Bedingungen über einer ebenen Fläche in (oder nahe) Meereshöhe darstellen. Deshalb können die Werte für die Überdruckspitze und den dynamischen Druck als Grundlagen verwendet werden, um die in Kapitel VI zu behandelnden Verfahren zur Ermittlung der unter verschiedenen Bedingungen zu erwartenden Luftdruckschäden anzuwenden.

3.93 Diese Standardkurven zeigen die Eigenschaften der Luftdruckwelle bei einer 1-kt-Explosion. Neben jeder Figur ist auf der gegenüberliegenden Seite ein

Beispiel für die Anwendung der Kurven gegeben. Zur Vereinfachung der Berechnungen ist Bild 3.93 dargestellt; hierin sind die Werte der Kubikwurzeln gegeben, die für die Anwendung der Umrechnungsgesetze benötigt werden.

3.94 Die Veränderung der Überdruckspitze mit der Entfernung vom Nullpunkt bei einer 1-kt-Bodenexplosion ist in Bild 3.94a und bei einer typischen Luftexplosion in Bild 3.94b gegeben[1]). Der Vollständigkeit halber ist in Bild 3.94a noch eine sog. »Überdruckkurve bei Explosion in freier Atmosphäre« dargestellt. Diese basiert auf der Annahme, daß die Explosion von W kt Energie bei Erdbodenberührung mit ihren Luftdruckerscheinungen der Explosion von $2W$ kt hoch in der Luft, und zwar vor der Reflexion, entspricht. Dies würde aber nur dann der Fall sein, wenn der Erdboden eine absolut harte, reflektierende Fläche wäre. Die bei Nichtvorhandensein von Erdboden an die untere Halbkugel der Luftdruckwelle übertragene Energie wird dann in die obere Halbkugel reflektiert, genau wie die normalerweise bei einer hohen Luftexplosion dorthin übertragene Energie. Die Entfernungen sind in diesem Falle (freie Atmosphäre) die Schrägentfernungen oder tatsächlichen Entfernungen von der Explosion. Bild 3.94c zeigt die Höhe des Machschen Stammes bei Luftexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers als Funktion der Entfernung vom Nullpunkt, wie durch den Tripelpunktweg dargestellt.

Die Kurven zeigen die Veränderung der Überdruckspitze mit zunehmender Entfernung bei Bodenexplosion eines 1-kt-Sprengkörpers und bei Luftexplosion eines 1-kt-Sprengkörpers (auf der Grundlage der 2-W-Annahme nach Abschn. 3.94) in Standard-Meereshöhenatmosphäre.

Umrechnung: Bei anderen Explosionswerten als 1 kt ist der Bereich, auf den sich ein gegebener Überdruck erstreckt, mit der Kubikwurzel des Explosionswertes zu errechnen, d. h.

$$d = d_0 \times W^{1/3}$$

Hierbei ist bei einem gegebenen Überdruck

d_0 = die Entfernung vom Explosionspunkt bei einem 1-kt-Atomsprengkörper

und d = die Entfernung vom Explosionspunkt bei einem W-kt-Atomsprengkörper.

Beispiel:

Gegeben: die Bodenexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers.

Suche: die Entfernung, auf welche sich 0,14 atü erstrecken.

Lösung: Nach Bild 3.93 ist die Kubikwurzel aus 1000 = 10. Nach Bild 3.94a tritt eine Überdruckspitze von 0,14 atü bei einer Entfernung von 850 m von

[1]) Definition und Beschreibung einer »typischen« Luftexplosion s. Abschn. 2.47. Die umgerechnete Explosionshöhe ist für jeden Explosionswert als gleich groß angenommen.

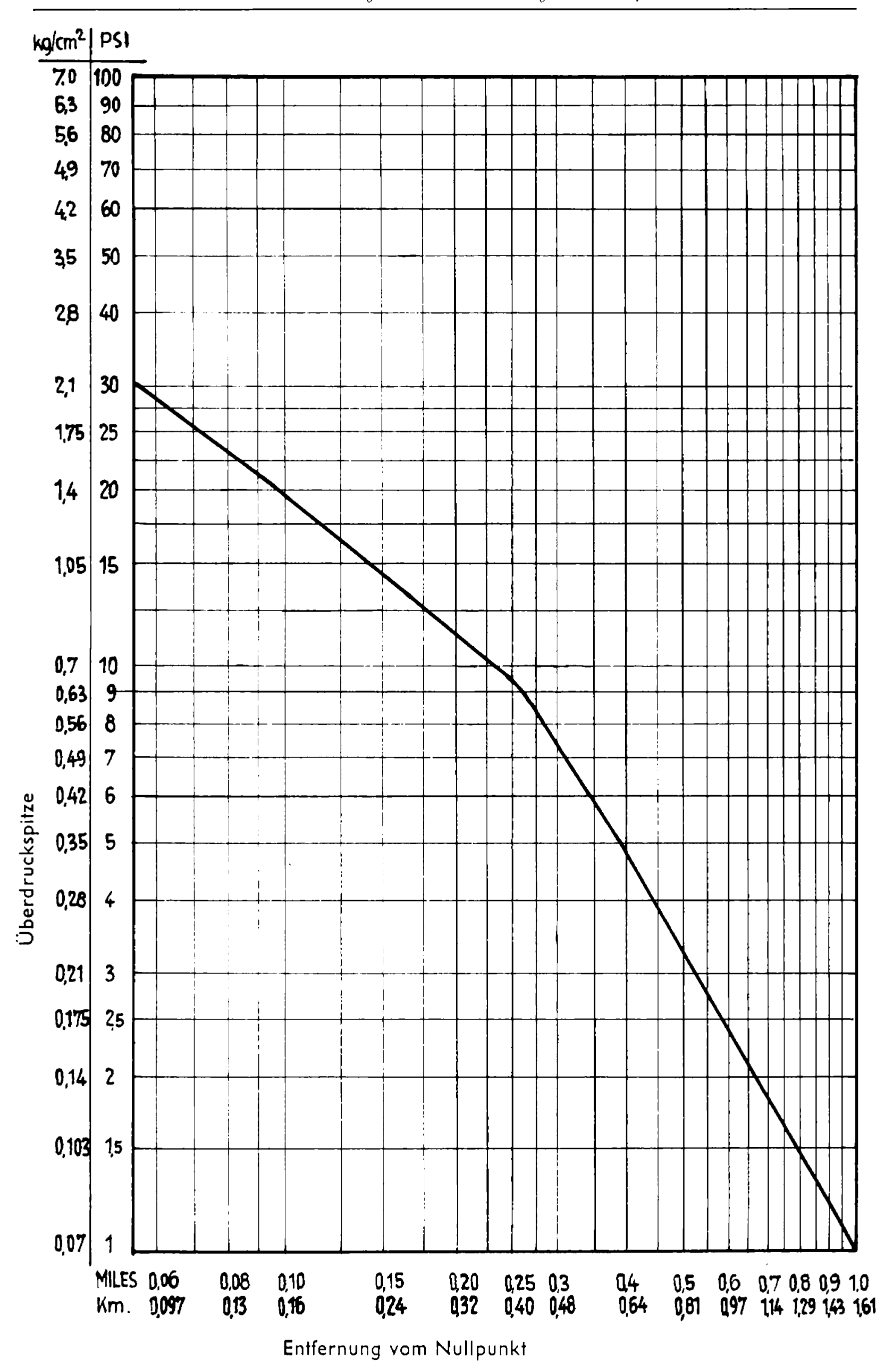


Bild 3.94b Überdruckspitze an der Erdoberfläche bei typischer Luftexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers

der Bodenexplosion eines 1-kt-Sprengkörpers ein. Deshalb ist bei Bodenexplosion eines 1-Megatonnen-Sprengkörpers

$$d = d_0 \times W^{1/3} = 850 \times 10 = 8500 \text{ m}.$$

Die Kurve zeigt die Veränderung der Überdruckspitze an der Erdoberfläche mit zunehmender Entfernung vom Nullpunkt bei typischer Luftexplosion eines 1-kt-Sprengkörpers in Standard-Meereshöhenatmosphäre bei durchschnittlichen Oberflächenverhältnissen.

Umrechnung: Bei anderen Explosionswerten als 1 kt ist der Bereich, auf den sich ein gewisser Überdruck erstreckt, mit der Kubikwurzel des Explosionswertes zu errechnen, d. h.

$$d = d_0 \times W^{1/3}$$

Hierbei ist bei einem gegebenen Überdruck

d_0 = die Entfernung vom Nullpunkt bei einem 1-kt-Sprengkörper

und d = die Entfernung vom Nullpunkt bei einem W-kt-Sprengkörper.

Beispiel:

Gegeben: die typische Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers.

Suche: die Entfernung vom Nullpunkt, auf welche sich 0,56 atü erstrecken.

Lösung: Nach Bild 3.93 ist die Kubikwurzel von 1000 kt = 10. Nach Bild 3.94b tritt eine Überdruckspitze von 0,56 atü bei einer Entfernung von 450 m vom Nullpunkt bei typischer Luftexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers ein. Deshalb ist bei typischer Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers

$$d = d_0 \times W^{1/3} = 450 \times 10 = 4500 \text{ m}.$$

Die Kurve zeigt die Zunahme der Höhe der Machschen Front mit zunehmender Entfernung vom Nullpunkt bei typischer Luftexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers in Standard-Meereshöhenatmosphäre bei durchschnittlichen Oberflächenverhältnissen.

Umrechnung: Bei anderen Explosionswerten als 1 kt sind Höhe und Entfernung der Machschen Front mit der Kubikwurzel des Explosionswertes zu errechnen, d. h.

$$h = h_0 \times W^{1/3} \quad \text{bei} \quad d = d_0 \times W^{1/3}$$

Hierbei ist

h_0 = die Höhe der Machschen Front bei einer Entfernung von d_0 bei einem 1-kt-Atomsprengkörper

und h = die Höhe der Machschen Front bei einer Entfernung d bei einem W-kt-Atomsprengkörper.

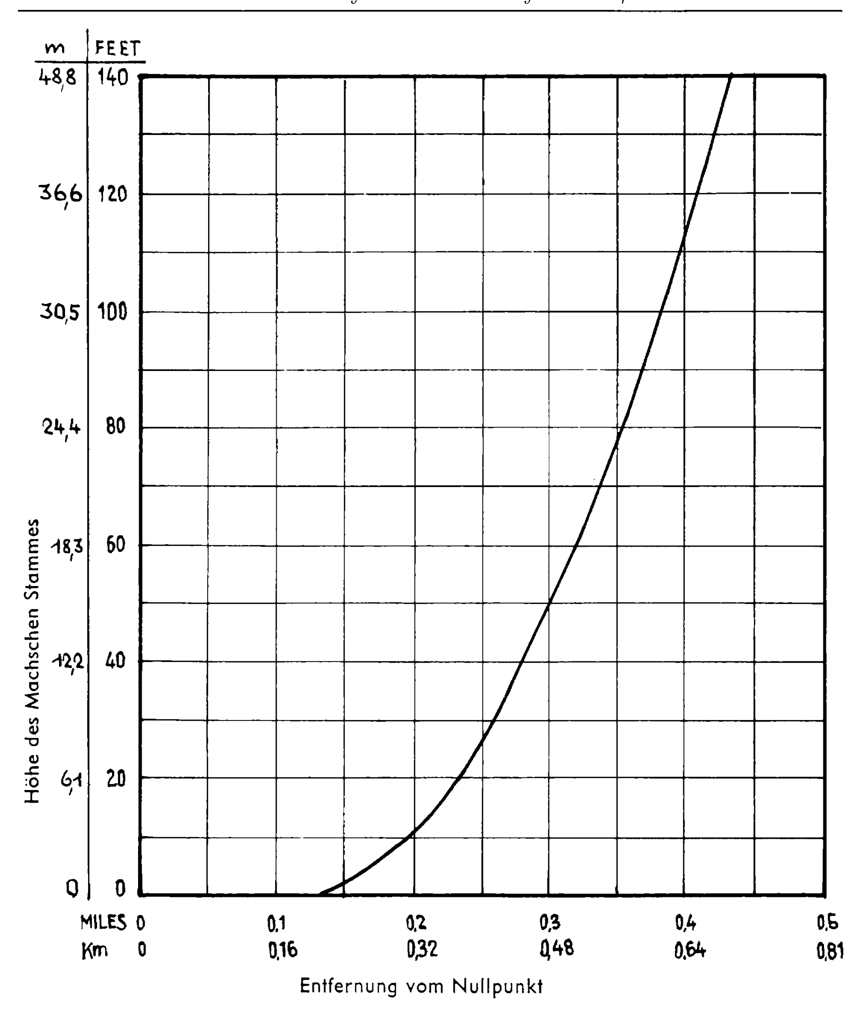


Bild 3.94c *Höhe des Machschen Stammes (Tripelpunktweg) bei einer 1-kt-Luftexplosion*

Beispiel:

Gegeben: die typische Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers.

Suche: a) die Entfernung vom Nullpunkt, bei der der Machsche Effekt beginnt;
b) die Höhe der Machschen Front bei 4400 m vom Nullpunkt.

Lösung: a) Dort, wo der Machsche Effekt beginnt, sind h und h_0 gleich groß, d. h. = null, so daß in diesem Falle $d = d_0 \times W^{1/3}$ ist. Nach Bild 3.93 ist die Kubikwurzel aus 1000 kt = 10, und nach Bild 3.94c setzt der Machsche Effekt bei Luftexplosion eines 1-kt-Sprengkörpers bei 210 m vom

Nullpunkt ein. Deshalb beginnt bei Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Sprengkörpers der Machsche Effekt bei einer Entfernung vom Nullpunkt, die sich ergibt aus

$$d = d_0 \times W^{1/3} = 210 \times 10 = 2100\,\text{m}.$$

b) Die Entfernung d_0 bei einem 1-kt-Atomsprengkörper, die bei einem 1-Megatonnen-Atomsprengkörper 4400 m beträgt, ist dementsprechend

$$d_0 = \frac{d}{W^{1/3}} = \frac{4400}{10} = 440\,\text{m}.$$

Die Höhe der Machschen Front ist bei dieser Entfernung vom Nullpunkt bei Luftexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers gemäß Bild 3.94c 11,30 m. Somit ist bei typischer Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers

$$h = h_0 \times W^{1/3} = 11{,}3 \times 10 = 113\,\text{m}.$$

3.95 In Bild 3.95 stellen die Kurven die horizontale Komponente des dynamischen Druckes als Funktion der Entfernung vom Nullpunkt bei Bodenexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers und bei typischer Luftexplosion dar. Die vertikale Komponente des dynamischen Druckes ist so gering, daß sie ohne Bedeutung ist – außer in der Nähe des Nullpunktes bei einer Luftexplosion. Da nur der Wert der horizontalen Komponente angegeben ist, wird der dynamische Druck im regulären Reflexionsbereich bei einer Luftexplosion um so geringer, je mehr die Entfernung vom Nullpunkt über einen bestimmten Punkt hinaus abnimmt.

Die Kurven zeigen die Veränderung der horizontalen Komponente des dynamischen Spitzendrucks mit zunehmender Entfernung vom Nullpunkt bei Luft- und Bodenexplosion in Standard-Meereshöhenatmosphäre bei durchschnittlichen Oberflächenverhältnissen.

Umrechnung: Bei anderen Explosionswerten als 1 kt ist der Bereich, auf den sich eine gegebene dynamische Druckhöhe erstreckt, mit der Kubikwurzel des Explosionswertes zu errechnen, d. h.

$$d = d_0 \times W^{1/3}$$

Hierbei ist bei einem gegebenen dynamischen Spitzendruck

d_0 = die Entfernung vom Nullpunkt bei einem 1-kt-Atomsprengkörper

und d = die Entfernung vom Nullpunkt bei einem W-kt-Atomsprengkörper.

Beispiel:

Gegeben: die Bodenexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers.

Suche: die horizontale Komponente des dynamischen Spitzendrucks, der bei 2900 m vom Nullpunkt zu erwarten ist.

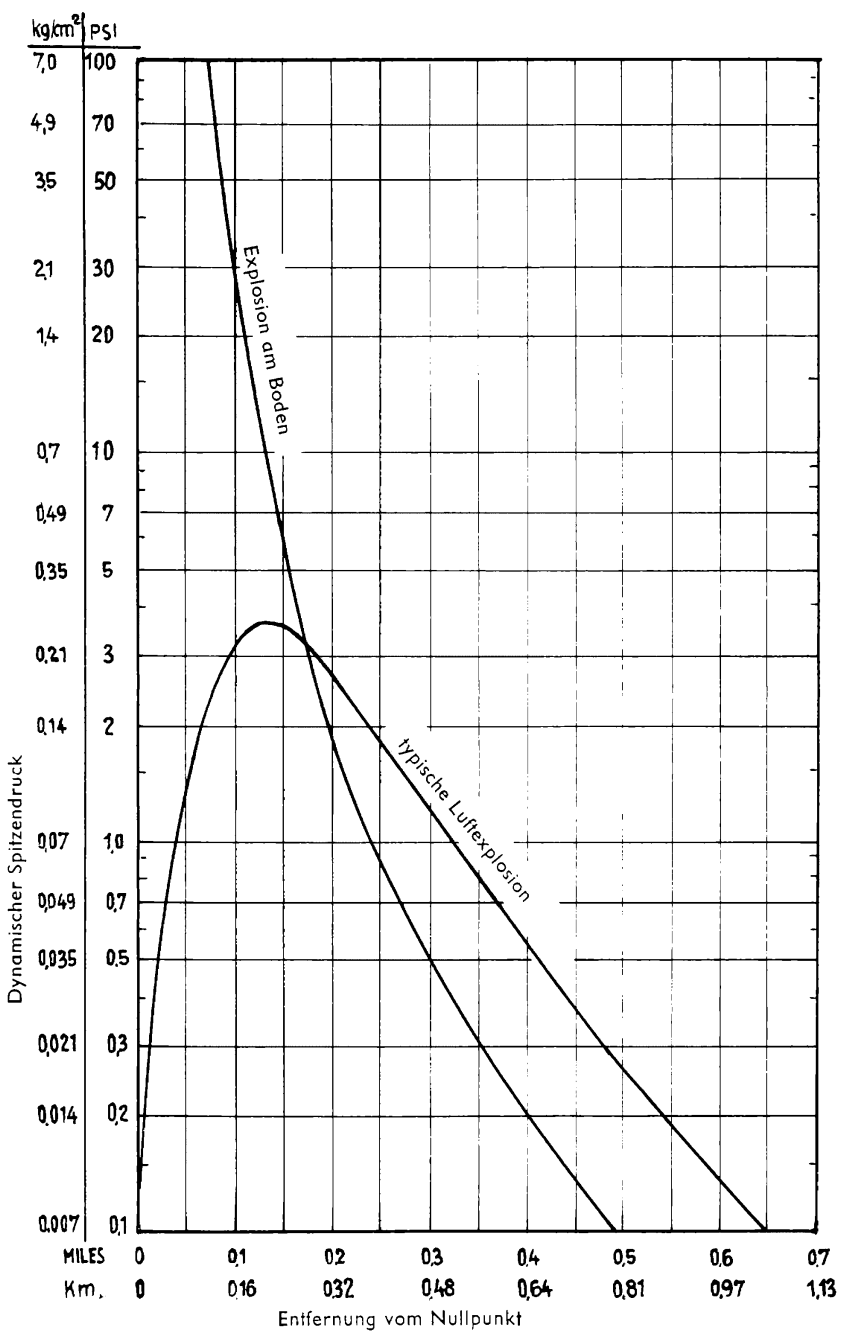


Bild 3.95 Horizontale Komponente der dynamischen Überdruckspitze bei einer 1-kt-Explosion

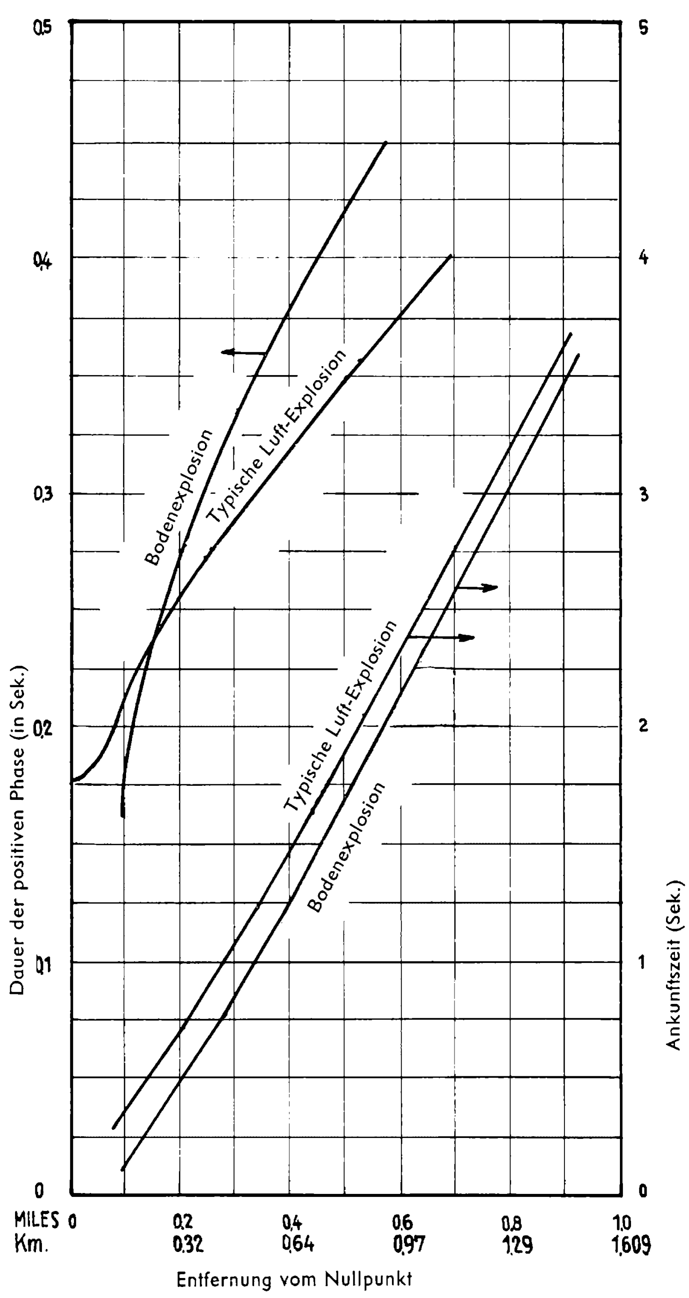


Bild 3.96 Ankunftszeit und Dauer der positiven Phase an der Erdoberfläche bei einer 1-kt-Explosion

Lösung: Nach Bild 3.93 ist die Kubikwurzel von 1000 = 10.

$$d_0 = \frac{d}{W^{1/3}} = \frac{2900}{10} = 290 \text{ m}$$ bei einem 1-kt-Atomsprengkörper.

Nach Bild 3.95 ist die horizontale Komponente des dynamischen Spitzendruckes bei 290 m bei Bodenexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers = 0,2 atü. Also beträgt die horizontale Komponente des dynamischen Spitzendruckes bei 2900 m vom Nullpunkt bei Bodenexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers = 0,2 atü.

3.96 Die Abhängigkeit der Ankunftszeit der Stoßfront und der Dauer der positiven Phase der Luftdruckwelle von der Entfernung vom Nullpunkt bei Bodenexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers und bei einer typischen Luftexplosion gleichen Explosionswertes sind in Bild 3.96 aufgezeigt.

Die Kurven zeigen die Abhängigkeit der Ankunftszeit und der Dauer der positiven Überdruckphase von der Entfernung der Luft- und Bodenexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers vom Nullpunkt in Standard-Meereshöhenatmosphäre bei durchschnittlichen Oberflächenverhältnissen.

Umrechnung: Bei anderen Explosionswerten als 1 kt können die Dauer und die Entfernung wie folgt errechnet werden:

$$t = t_0 \times W^{1/3} \quad \text{bei} \quad d = d_0 \times W^{1/3}$$

Hierbei ist

t_0 = die Ankunftszeit und die Dauer der positiven Phase bei einem 1-kt-Atomsprengkörper in einer Entfernung d_0;

t = die Ankunftszeit oder die Dauer der positiven Phase bei einem W-kt-Atomsprengkörper in einer Entfernung d.

Beispiel:

Gegeben: ein 1-Megatonnen-Atomsprengkörper wird an der Erdoberfläche zur Explosion gebracht.

Suche: die Ankunftszeit und die Dauer der positiven Phase bei einer Entfernung von 8800 m.

Lösung: Nach Bild 3.93 ist die Kubikwurzel aus 1000 kt = 10. Nach Bild 3.96 beträgt die Ankunftszeit der positiven Phase bei einer Entfernung von 880 m bei Bodenexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers 1,9 Sekunden, und die Dauer der positiven Phase beträgt 0,44 Sekunden. Bei Bodenexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers betragen

die Ankunftszeit der positiven Phase:

$$t = t_0 \times W^{1/3} = 1{,}9 \times 10 = 19 \text{ Sekunden;}$$

die Dauer der positiven Phase:

$$t = t_0 \times W^{1/3} = 0{,}44 \times 10 = 4{,}4 \text{ Sekunden.}$$

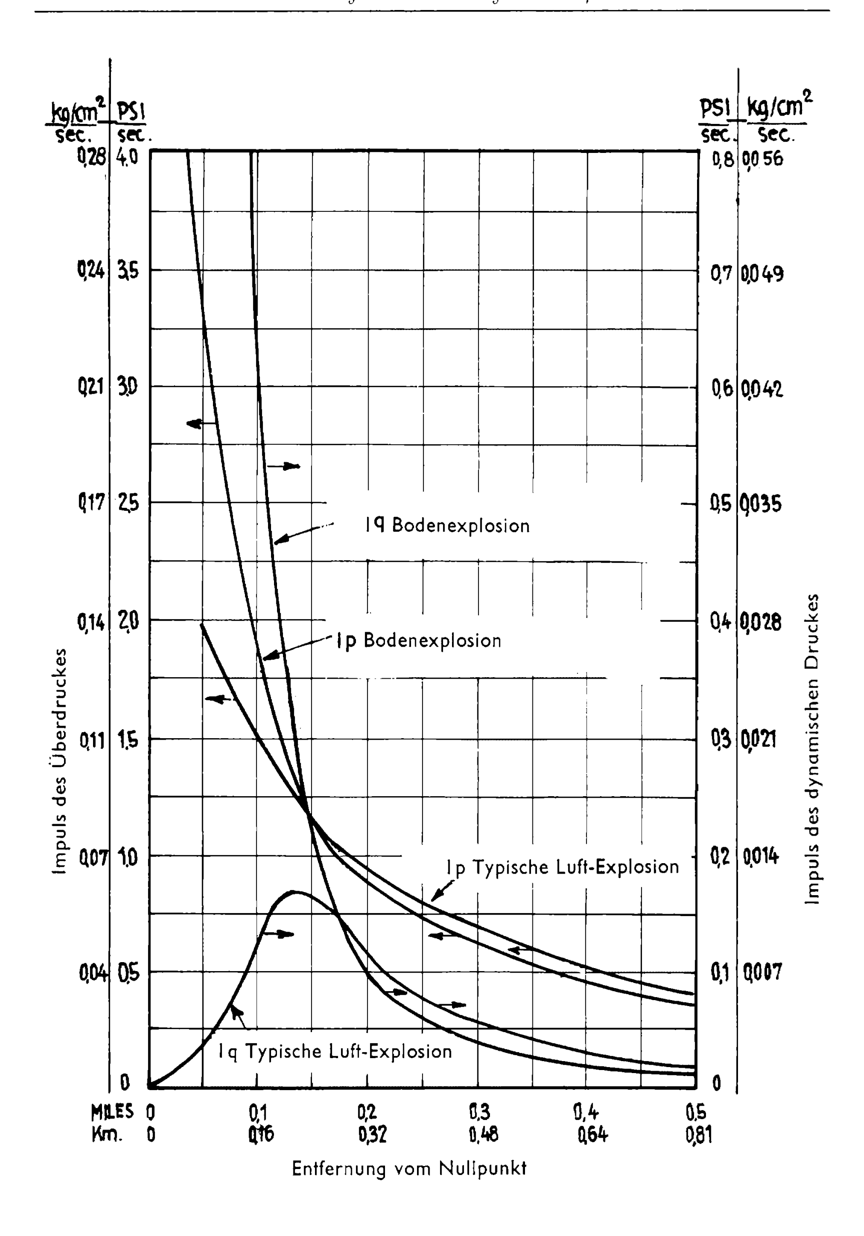


Bild 3.97 Impuls der positiven Phase des Überdruckes und des dynamischen Druckes bei einer 1-kt-Explosion

3.97 Schließlich gibt Bild 3.97 noch die Impulse der positiven Phase des Überdruckes und des dynamischen Druckes I_p bzw. I_q als Funktion der Entfernung vom Nullpunkt bei Bodenexplosion und bei einer typischen Luftexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers an. In allen anderen Fällen gelten die Ergebnisse für eine Explosion in Standard-Meereshöhenatmosphäre bei durchschnittlichen Oberflächenverhältnissen.

Die Kurven zeigen die Veränderung der Impulse des Überdrucks und des dynamischen Druckes (horizontale Komponente) in der positiven Phase mit zunehmender Entfernung bei Luft- und Bodenexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers in Standard-Meereshöhenatmosphäre bei durchschnittlichen Oberflächenverhältnissen.

Umrechnung: Bei anderen Explosionswerten als 1 kt können Impuls und Entfernung wie folgt berechnet werden:

$$I = I_0 \times W^{1/3} \quad \text{bei} \quad d = d_0 \times W^{1/3}$$

Hierbei ist

I_0 = der Impuls bei Explosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers in einer Entfernung d_0

und I = der Impuls bei Explosion eines W-kt-Atomsprengkörpers in einer Entfernung d.

Beispiel:

Gegeben: typische Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers.

Suche: die Entfernung, bei welcher der Überdruckimpuls der positiven Phase = 0,385 sec · atü ist.

Lösung: Nach Bild 3.93 ist die Kubikwurzel aus 1000 kt = 10.

$$I_0 = \frac{I}{W^{1/3}} = \frac{5,5}{10} = 0,039 \text{ sec} \cdot \text{atü}.$$

Nach Bild 3.97 beträgt die Entfernung, bei welcher der Überdruckimpuls der positiven Phase bei typischer Luftexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers 0,039 sec · atü ist, 640 m. Bei typischer Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers ist

$$d = d_0 \times W^{1/3} = 640 \times 10 = 6400 \text{ m}.$$

KAPITEL IV

Bauliche Schäden durch Luftdruck

Einleitung

Allgemeine Bemerkungen

4.1 Das vorige Kapitel behandelte die allgemeinen Grundlagen des Luftdrucks und seiner Wirkung auf Bauwerke. Jetzt sollen die tatsächlichen Zerstörungen betrachtet werden, die eine Kernexplosion bei verschiedenen Gebäudetypen, Brücken, Versorgungsanlagen und Fahrzeugen anrichtet. Aus Untersuchungen in Hiroshima und Nagasaki sind einige dieser Kenntnisse – besonders hinsichtlich großer Bauwerke – gewonnen worden. Über jeder dieser japanischen Städte wurde ein Atomsprengkörper von etwa 20 kt Explosionswert in einer Höhe von rund 560 m zur Explosion gebracht. Diese Erkenntnisse sind kürzlich durch weitere Angaben ergänzt worden, die im Zusammenhang mit verschiedenen Versuchen, besonders auf dem Versuchsgelände von Nevada in USA, gewonnen wurden. Das folgende Kapitel gibt vor allem eine Beschreibung; eine mehr technische Erläuterung der baulichen Schäden ist in Kapitel VI gegeben.

4.2 Vor der genauen Schilderung des Verhaltens bestimmter Gebäudetypen muß die Aufmerksamkeit auf den wichtigen Unterschied zwischen der Luftdruckwirkung von Atomsprengkörpern und derjenigen von herkömmlichen Sprengkörpern gelenkt werden. Die Kombination von hohen Maximaldrücken und längerer Dauer der positiven Druckphase der Luftdruckwelle im ersteren Falle verursacht eine Massenverformung ähnlich der Wirkung von Erdbeben. Eine gewöhnliche Explosion beschädigt meist nur einen Teil eines großen Bauwerks, aber die Kernexplosion kann ganze Gebäude erfassen und zerstören.

4.3 Eine Untersuchung der Gebiete in Japan, die von Atomsprengkörpern betroffen waren, zeigte, daß kleine Gebäude aus Mauerwerk von der herannahenden Luftdruckwelle umfaßt wurden und in sich zusammenfielen. Leichte Bauwerke und Wohnhäuser wurden durch den Luftdruck völlig zerstört und anschließend durch Feuer vernichtet. Von Industriegebäuden in Stahlkonstruktion wurden Dächer und Seitenwände abgerissen, nur die verbogenen Rahmen blieben erhalten. In der nächsten Umgebung wurde fast alles zerstört, ausgenommen Gebäude und Schornsteine aus stark bewehrtem Beton. Manche Gebäude neigten sich in Richtung vom Explosionszentrum fort, als ob sie von einem Wind mit enormer Gewalt getroffen wären. Telefonmasten waren direkt über dem Boden abgebrochen wie bei einem Wirbelsturm, die Drähte waren mit heruntergerissen. Große Gasbehälter zerbrachen und fielen durch die zermalmende Wirkung der Druckwelle in sich zusammen.

4.4 Viele Gebäude, die aus der Entfernung gesehen heil schienen, zeigten sich bei näherer Betrachtung als beschädigt und waren im Innern ausgebrannt. Das war häufig ein indirektes Ergebnis der Druckwirkung. In manchen Fällen kann die thermische Strahlung Brände verursacht haben, aber in vielen Fällen entstand das Feuer durch umgeworfene Öfen und Herde und durch gebrochene Gasleitungen. Der Verlust an Wasserdruck durch unterbrochene Rohrleitungen, hauptsächlich durch zerstörte Häuser verursacht, und andere Begleitumstände der Explosion trugen zu der zusätzlichen Zerstörung durch Brände bei.

4.5 Eine sehr wichtige Folge der ungeheuren Kraft einer Kernexplosion ist die Entstehung einer enormen Anzahl von herumfliegenden Geschossen in Form von Steinen (und sonstigem Mauerwerk), Glas, Holz- und Metallteilen usw. Diese verursachten eine beträchtliche Anzahl von geringeren Gebäudeschäden sowie zahlreiche Verluste. Außerdem verstopften diese großen Schuttmengen die Straßen und machten so die Rettungs- und Brandbekämpfungsmaßnahmen äußerst schwierig.

4.6 Es darf darauf hingewiesen werden, daß viele Bauwerke in Japan erdbebensicher konstruiert waren, was sie wahrscheinlich widerstandsfähiger machte als die meisten entsprechenden Bauten in den USA. Andererseits waren viele Konstruktionen zweifellos leichter als bei uns. Im Gegensatz zu der populären Auffassung von dem wenig stabilen Zustand der japanischen Häuser geht die begründete Meinung einer Gruppe von Architekten und Ingenieuren, die die Schäden untersuchten, dahin, daß die amerikanischen Wohnhäuser im allgemeinen auch nicht widerstands-



Bild 4.5 Trümmer nach der Kernexplosion in Hiroshima

fähiger wären als die von Hiroshima und Nagasaki. Das wurde durch die Versuche in Nevada in den Jahren 1953 und 1955 bestätigt.

4.7 Die Darstellung der verschiedenen Arten von Luftdruckschäden in den folgenden Teilen dieses Kapitels ist in drei Hauptabschnitte wie folgt aufgeteilt:

1. Bauwerke und ihr Inhalt, einschließlich Wohnhäuser verschiedener Art, industrielle, gewerbliche und Verwaltungsbauten sowie Brücken;

2. Transport und Verkehr einschließlich Autos und anderer Fahrzeuge, Eisenbahnen, Luftfahrt und Schiffe;

3. Versorgungsanlagen einschließlich Elektrizität-, Gas- und Wasserversorgung sowie Nachrichtenübermittlung.

Bauwerke und deren Inneres

Wohnbauten

4.8 Es gab in den japanischen Städten viele Wohnhäuser mit Holzrahmen und Lehmwänden, die dem Atomangriff ausgesetzt waren, aber eine so große Anzahl von ihnen wurde durch Feuer zerstört, daß man sehr wenig genaue Informationen über die Druckwirkung erhielt. Es schien, daß man keinen großen Wert auf moderne Konstruktionsgrundsätze gelegt hatte, obwohl die handwerkliche Qualität der Rahmen ausgezeichnet war. Im ganzen war daher die Konstruktion nicht darauf eingerichtet, zerstörenden Kräften standzuhalten. Zum Beispiel waren die Zapfenverbindungen schwache Punkte in den Gebäuden, und der konstruktive Zusammenhalt war im allgemeinen gering. Die Holzbauteile waren oft mehr als nötig eingelassen oder die Holznägel an unrichtigen Stellen eingesetzt. Hierdurch ergab sich eine allgemeine Schwächung der Konstruktion.

4.9 In Nagasaki fielen Wohnhäuser in einer Entfernung bis zu etwa 2 km vom Nullpunkt in sich zusammen. Der stärkste Überdruck wurde dort auf ungefähr 0,2 atü geschätzt. Bis zu einer Entfernung von etwa 2,5 km gab es mäßig schweren Gebäudeschaden. Dächer, Seiten- und Trennwände wurden bis zu 2,75 km beschädigt. Dort betrug der Überdruck annähernd 0,14 atü, aber die Gebäude wären mit Reparaturarbeiten mittleren Umfanges wieder bewohnbar zu machen gewesen.

4.10 Wesentliche Informationen über die Druckwirkung auf Wohnbauten verschiedener Art erhielt man durch die Untersuchungen der Versuchsbauten in Nevada 1953 und besonders 1955. Der im Versuch vom 17. März 1953 verwendete Atomsprengkörper wurde auf der Spitze eines 91,5 m hohen Turmes zur Explosion gebracht; die freigewordene Energie betrug ungefähr 15 Kilotonnen. Bei dem Versuch im Mai 1955 fand die Explosion auf einem Turm von 151 m Höhe statt. Der Explosionswert betrug rund 30 kt. In jedem Falle machten Luftdruckmessungen es möglich, wo es angebracht war, eine Beziehung zwischen Luftdruckschäden und der Überdruckspitze herzustellen.

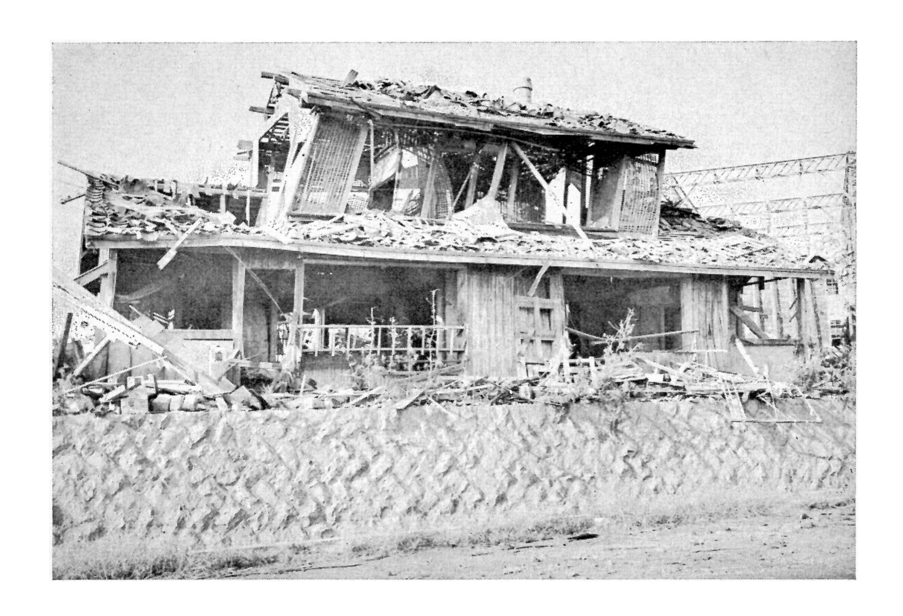




Bild 4.8 *Oberes Bild: Holzrahmenbauwerk, etwa 1,5 km vom Nullpunkt in Hiroshima*
Unteres Bild: Gerippe eines im Bau befindlichen Wohnhauses; beachte die kleinen Zapfen

4.11 Die Hauptgründe für die Versuche an Wohnbauten waren folgende:

1. die für Luftdruckschäden empfindlichsten Bauteile festzustellen und entsprechende Verfahren zur Verstärkung der verschiedenen Konstruktionen zu entwickeln;

2. Informationen zu erhalten über das Ausmaß der bei einer Kernexplosion zu erwartenden Schäden sowie darüber, wie weit diese Gebäude ohne größere Reparaturen wieder bewohnbar gemacht werden könnten;

3. festzustellen, wie man während eines Atomangriffs in den Häusern verbleibende Personen vor den Luftdruck- und Strahlenwirkungen schützen könnte.

Nur die ersten zwei Punkte sind hier behandelt, denn dieses Kapitel befaßt sich vornehmlich mit den Luftdruckwirkungen. Über das Problem des Schutzes s. Kap. XII.

Zweigeschossiges Holzfachwerkhaus
Versuch von 1953

4.12 Bei einem Versuch von 1953 wurden zwei im wesentlichen gleiche Häuser von einem in USA gebräuchlichen Typ an zwei verschiedenen Standorten verwendet. Sie waren von typischer Holzfachwerk-Konstruktion, mit zwei Geschossen, einem Keller und einem gemauerten Schornstein. Das Innere war verputzt, aber nicht gestrichen. Da die Versuche dem Studium von Druckwirkungen dienen sollten, traf man Vorsichtsmaßnahmen zur Verhütung von Bränden. Das Äußere wurde deshalb (mit Ausnahme der Fensterläden) weiß angestrichen, um die thermische Strahlung zu reflektieren. Aus dem gleichen Grunde wurden die Fenster zur Explosionsseite hin mit metallenen Läden mit Aluminiumanstrich ausgestattet. Außerdem waren die Dächer mit hellgrauen Ziegeln gedeckt; bei dem näher am Explosionszentrum gelegenen Haus, wo die Brandgefahr größer war, waren die Ziegel aus Asbestzement, während bei dem anderen Haus Asphaltziegel benutzt wurden. Es fehlte jegliche Installation.

4.13 Eines der beiden Häuser lag im Bereich der Mach-Reflexion, wo die Druckspitze der ankommenden Welle etwa 0,35 atü erreichte. Nach den Wirkungen in Japan erwartete man, daß dieses Haus fast vollständig zerstört würde – wie es auch tatsächlich geschah –, aber der Hauptzweck war zu sehen, welchen Schutz Menschen im Keller haben würden. Beim zweiten Haus betrug der Maximaldruck der ankommenden Welle 0,12 atü. Hier erwartete man nur Teilschäden, so daß der Versuch Anhaltspunkte für bauliche Verbesserungen geben könnte.

4.14 Einen Eindruck von den Luftdruckschäden an dem Haus in der Nähe des Explosionszentrums kann man aus der Abbildung 4.14 gewinnen. Es ist offensichtlich, daß das Haus so zerstört war, daß keine Reparatur mehr möglich war. Das erste Geschoß war völlig zerstört, und das zweite, stark beschädigt, fiel auf die Trümmer des ersten. Das Dach wurde in verschiedenen Teilen abgehoben, die sowohl vor als auch hinter dem Haus herunterfielen. Die Giebelwände wurden beiseite und nach außen gedrückt, der gemauerte Schornstein war in mehrere Stücke gebrochen.

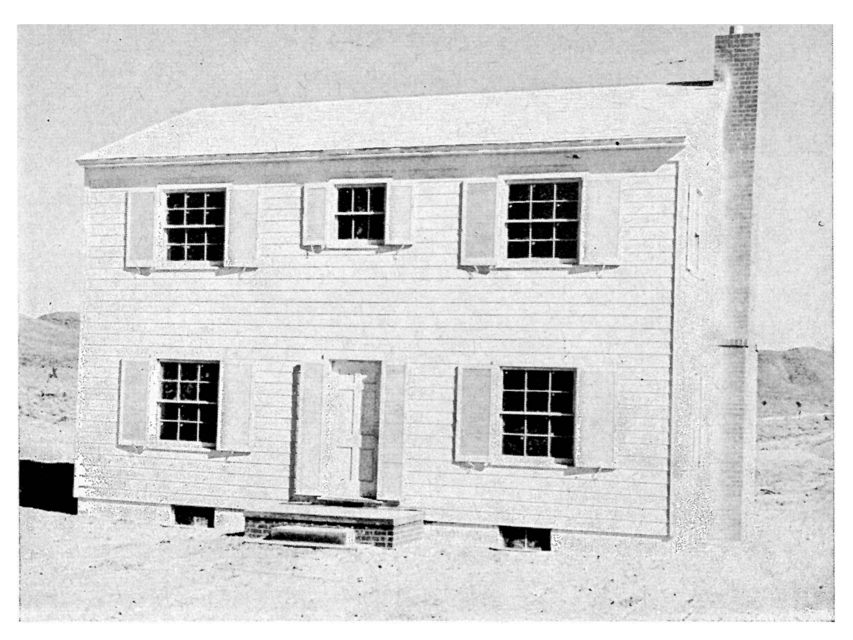


Bild 4.12 Holzfachwerkhaus vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada



Bild 4.14 Holzfachwerkhaus nach der Kernexplosion (0,35 atü Überdruck)

4.15 Die Kellerwände waren etwas über Erdgleiche beschädigt, hauptsächlich auf der Rückseite, d. h. auf der von der Explosion abgewandten Seite. Die vordere Kellerwand war leicht eingedrückt, aber nur an den Enden gerissen. Die tragenden Balken des ersten Geschosses waren nach unten eingedrückt (vermutlich durch den Luftdruckunterschied zwischen dem ersten Geschoß und dem größtenteils abgeschlossenen Keller), und die tragenden Stützen waren nach hinten geneigt. Trotzdem war das erste Geschoß nur an begrenzten Stellen vollständig in den Keller durchgebrochen. Der Rest des Kellers war vergleichsweise frei, und die dort angelegten Schutzbauten waren nicht betroffen.

4.16 Das zweite Haus, einem ankommenden Maximaldruck von 0,12 atü ausgesetzt, war sowohl innen wie außen schwer beschädigt, aber es blieb stehen. Wenn auch eine völlige Wiederherstellung sehr teuer gewesen wäre, nimmt man doch an, daß mit dem Dichtmachen von Fenster- und Türöffnungen und durch Abstützen im Keller das Haus im Notfall hätte bewohnbar gemacht werden können.

4.17 Den offensichtlichsten Schaden hatten Türen und Fenster einschließlich der Rahmen erlitten. Die Haustür war in Stücke gebrochen, und die Türen von Küchen- und Kellereingang waren aus den Angeln gerissen. Die Schäden an den inneren Türen waren verschieden; die vor der Explosion geöffneten hatten am wenig-

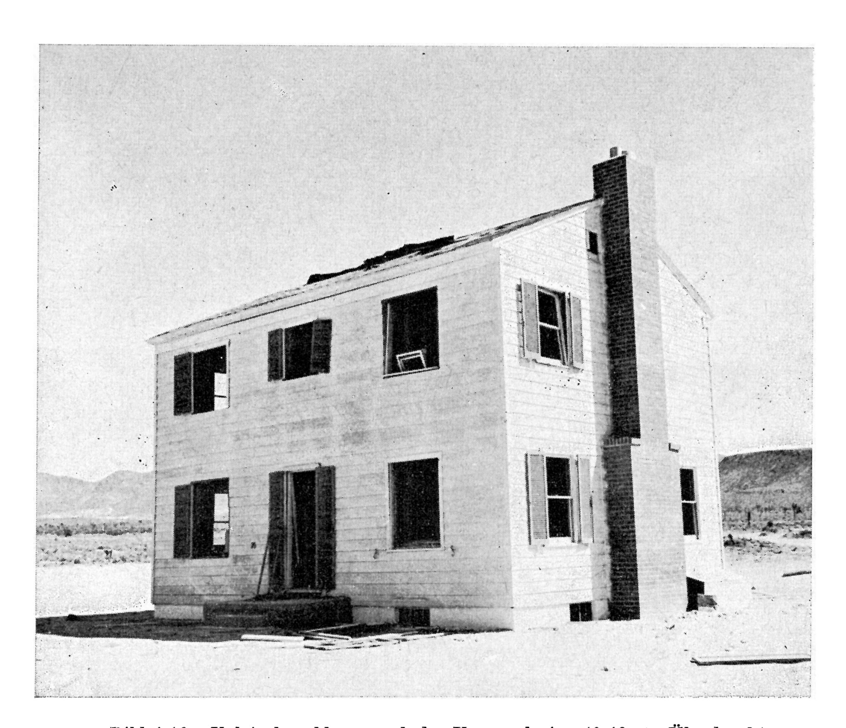


Bild 4.16 Holzfachwerkhaus nach der Kernexplosion (0,12 atü Überdruck)

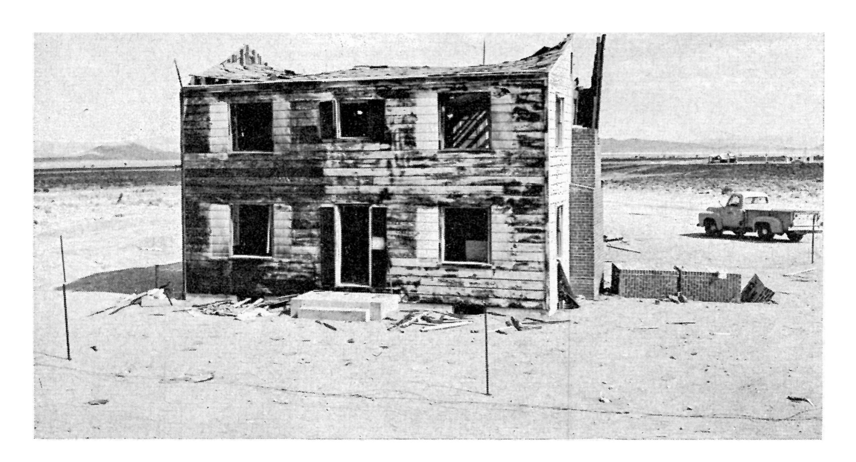


Bild 4.22 Verstärktes Holzfachwerkhaus nach der Kernexplosion (0,28 atü Überdruck)

sten gelitten. Das Fensterglas war im ganzen Haus zersplittert, und der Druck auf den Fensterverschluß hatte, besonders an der Hausfront, die Rahmen herausgerissen.

4.18 Die Konstruktion im ersten Geschoß war hauptsächlich in den Tragbalken beschädigt. Die meisten Brüche traten bei den Astansätzen an den unteren Kanten der 5×20 cm Balken (40 cm Abstand) auf. Die meisten Pfosten (5×10 cm,40 cm Abstand) an der Vorderseite des Hauses waren gebrochen.

4.19 Das zweite Geschoß hatte in der Konstruktion weniger gelitten, aber die Fenster waren zerstört und der Putz gerissen. Die Schäden am Dach bestanden hauptsächlich aus gebrochenen Dachbalken (5×15 cm, 40 cm Abstand). An der Vorderseite waren alle bis auf einen betroffen, an der Rückseite war keiner der Balken ernstlich beschädigt. Das Dach (Spannweite 3,55 m von der Vorderseite bis zum First) war am First leicht gerissen.

4.20 Der Keller zeigte keine Schäden außer an den Fenstern, Eingangstür und Türrahmen. Die Schutzräume im Keller waren intakt.

Zweigeschossiges Holzhaus. Versuch von 1955

4.21 Für den Versuch von 1955 wurden zwei gleiche Holzhäuser benutzt, die man nach den oben gewonnenen Erfahrungen mit gewissen Verbesserungen konstruiert hatte. Folgende Änderungen, die den geschätzten Preis der Häuser um 10% gegenüber dem normaler Bauweise erhöhten, wurden vorgenommen: 1. bessere Ver-

bindungen zwischen Außenwänden und Fundament; 2. Stahlbetonversteifungswände als Ersatz für die tragenden Stützen im Keller; 3. Verwendung stärkerer Balken und Verbindungen im ersten Geschoß; 4. Verwendung von Sperrholz anstelle von Gipsleichtwänden; 5. stärkere Balken (5 × 20 cm) und Wandpfosten; 6. stärkere Befestigung der Fensterrahmen in den Öffnungen.

4.22 Man erwartete selbst bei diesen Verbesserungen noch eine völlige Zerstörung bei einem Maximaldruck von 0,35 atü, und so wurde eines der Häuser an einer Stelle errichtet, wo der Überdruck an der Front der Mach-Welle 0,28 atü betragen würde. Teils wegen dieser Verstärkung und teils wegen der geringeren Druckwelle fiel das Haus nicht zusammen (Bild 4.22). Trotzdem war die oberirdische Konstruktion so schwer beschädigt, daß es ohne teure Reparaturen nicht wieder hätte bewohnt werden können, was aus wirtschaftlichen Gründen nicht angebracht gewesen wäre.

4.23 Die vordere Hälfte des Daches war in der Mitte gebrochen, und der ganze Dachstuhl lag auf den Deckenbalken. Die hintere Hälfte des Daches war abgerissen und fiel ungefähr 7,5 m hinter dem Hause auf den Boden. Die meisten Balken waren der Länge nach gespalten, trotz der vergrößerten Maße.

4.24 Die Balken des ersten Geschosses waren gespalten oder gebrochen, und der Boden brach fast zusammen; er wurde hauptsächlich durch Zwischenboden und die Dielen gehalten, die im ganzen intakt geblieben waren (Bild 4.24). Der Fußboden im zweiten Geschoß und die Decke des ersten zeigten wenig Schäden, was auf raschen



Bild 4.24 Balken des ersten Geschosses im verstärkten Holzfachwerkhaus nach der Kernexplosion (0,28 atü Überdruck)

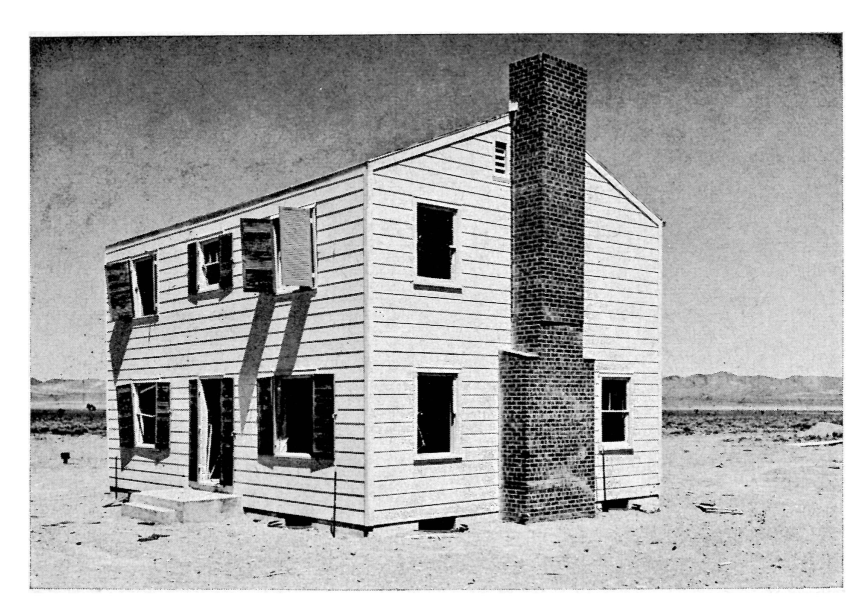


Bild 4.25 Verstärktes Holzfachwerkhaus nach der Kernexplosion (0,18 atü Überdruck)

Druckausgleich über und unter der Geschoßdecke schließen ließ. Dies wurde dadurch ermöglicht, daß fast alle Türen und Fenster herausgerissen worden waren. Der obere Teil des Schornsteins fiel nach außen. Obwohl der untere Teil stehenblieb, war er an einigen Stellen beschädigt und verschoben.

4.25 Das andere verstärkte zweigeschossige Holzhaus stand an einer Stelle, wo der Maximaldruck 0,18 atü betrug; das lag merkbar höher als der niedrigere Überdruck beim Versuch von 1953. Verhältnismäßig schwere Schäden wurden festgestellt, aber der Zustand des Hauses hätte es ermöglicht, das Haus als Behelfsschutzraum zu benutzen, nachdem es im Innern abgestützt und einige nicht zu teure Reparaturen ausgeführt worden waren (Bild 4.25). Obwohl einige Unterschiede in Einzelheiten bestanden, waren die Schäden im ganzen desselben Grades wie bei dem entsprechenden Haus ohne die verbesserte Konstruktion bei Maximaldruck von 0,12 atü.

4.26 Außer den Türen und Fenstern litt die Konstruktion des Hauses, besonders das Dach, am meisten unter der Druckwelle. Das Gesimsbrett an der der Explosion zugewandten Seite war abgerissen, und offensichtlich würde eine etwas stärkere Druckwelle das Dach völlig von seiner Verbindung mit dem Bau abgehoben haben. Ein Teil der Deckenbalkenlage war mehrere Zentimeter hochgehoben worden, ein Firstbrett war zerbrochen und einige Dachbalken gebrochen; einer der mittleren Dachbinder war von den Querbalken weggerissen, und ein Teil der Sperrholzdeckenverkleidung war abgerissen. Trotzdem waren nur wenige der tragenden Deckenbalken im zweiten Geschoß beschädigt.



Bild 4.27 Balken des ersten Geschosses im verstärkten Holzfachwerkhaus nach der Kernexplosion (0,18 atü Überdruck)

4.27 Die Decken und Wände des ersten Geschosses waren nur wenig betroffen. Die Fußbodenbalken waren gerissen und gebrochen, aber keine Trümmer fielen in den Keller, da die Zwischendecke intakt blieb.

4.28 Die hölzernen Fensterrahmen an der Front und den Seiten des Hauses waren nach innen geblasen und zerstört; an der Rückseite hatten sie weniger gelitten. Die Außentüren waren eingedrückt, und einige der Innentüren waren aus den Angeln gerissen. Der Schornstein war mindestens an zwei Stellen durchgerissen, aber er blieb stehen.

Zweigeschossiges Backsteinhaus

4.29 Zum Vergleich mit den Versuchen von 1953 an zweigeschossigen Häusern in Holzkonstruktion wurden zwei Backsteinhäuser herkömmlicher Bauweise, gleicher Größe und Grundrißgestaltung in den Versuchen von 1955 einem Überdruck von 0,35 und 0,12 atü ausgesetzt (Bild 4.29). Die Außenwände waren aus Schlackensteinen mit Ziegelverkleidung und die Fundamente nur aus Schlackensteinen; die Fußböden, Trennwände und das Dach bestanden aus Holzkonstruktion.

4.30 Bei einem Überdruck von 0,35 atü war das Backsteinhaus völlig zerstört (Bild 4.30). Die Außenwände waren nach außen gedrückt, so daß wenig Mauerschutt auf die Geschoßdeckenkonstruktion fiel. Das Dach wurde zerstört und flog fort, die

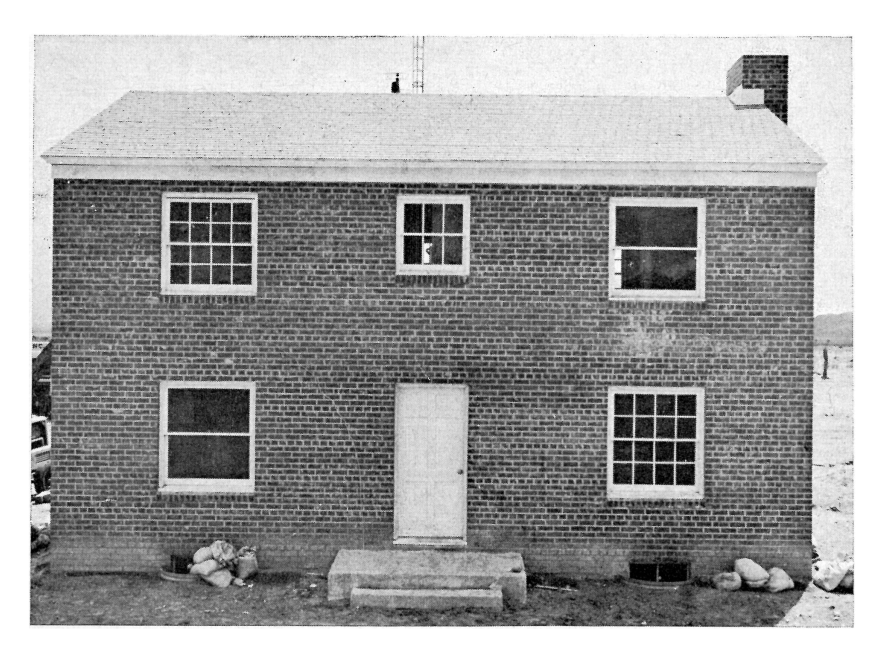


Bild 4.29 Nicht bewehrtes Backsteinhaus vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada



Bild 4.30 Nicht bewehrtes Backsteinhaus nach der Kernexplosion (0,35 atü Überdruck)

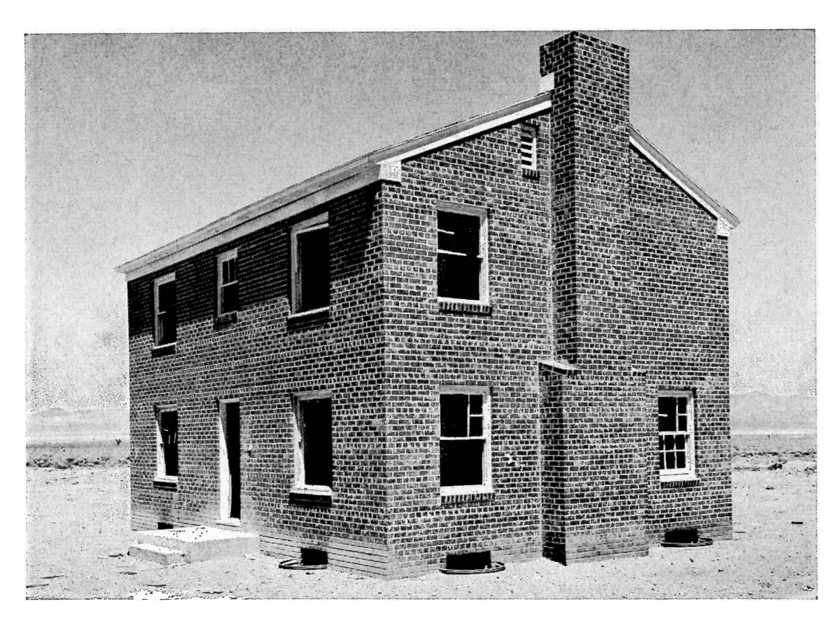


Bild 4.31 Nicht bewehrtes Backsteinhaus nach der Kernexplosion (0,12 atü Überdruck)

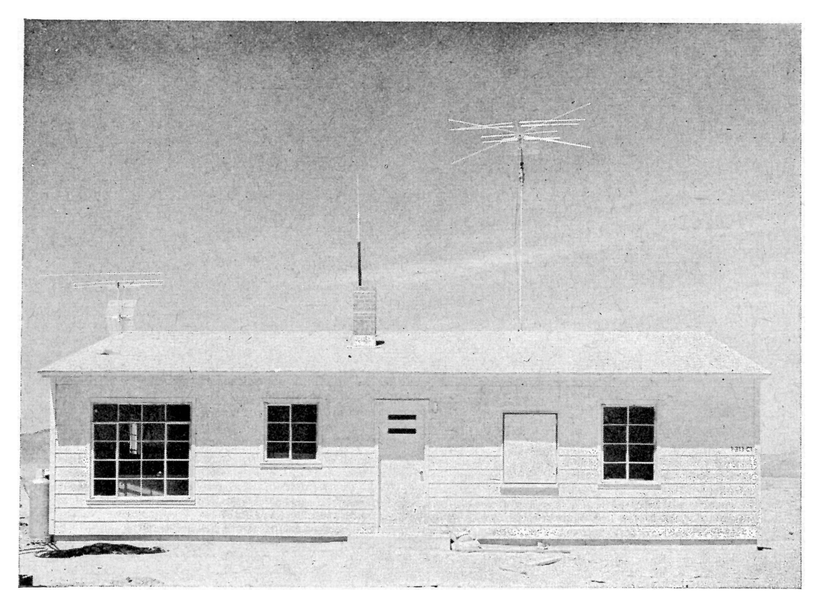


Bild 4.34 Haus im Bungalow-Stil vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada. (Drucktür vor Badezimmerfenster rechts)

rückwärtige Hälfte landete 15 m hinter dem Hause. Der Erdgeschoßfußboden war zum Teil in den Keller gefallen, da die Balken in der Mitte gebrochen waren und die Last des zweiten Fußbodens daraufgefallen war. Der Schornstein war in mehrere große Teile gebrochen.

4.31 Das entsprechende Gebäude, das weiter ab von der Explosion lag, wo der Überdruck 0,12 atü betrug, war beträchtlich beschädigt. Dessen ungeachtet war sein Zustand so, daß es mit Abstützen und billigen Reparaturen wieder bewohnbar gemacht werden konnte.

4.32 Das Mauerwerk des Hauses hatte keinen ersichtlichen Schaden gelitten, aber das Dach und die Deckenkonstruktion vom zweiten Geschoß waren schwer beschädigt. Die Verbindungen der hinteren Dachsparren am First gaben nach, und die Balken senkten sich mehrere Zentimeter. Der First spaltete sich im mittleren Teil, und einige der 5 × 10-cm-Kehlbalken brachen in zwei Teile. Die Deckenbalken auf der Rückseite waren in der Mitte gespalten und der Putz und Putzträger heruntergefallen. Die Holzkonstruktion im zweiten Geschoß war nicht besonders betroffen, und nur einige Balken im Erdgeschoß waren gebrochen. Der Verputz an den inneren Wänden und Decken war schwer beschädigt.

4.33 Das Glas der vorderen und seitlichen Fenster war nach innen gedrückt, aber die rückwärtigen Fenster hatten viel weniger gelitten. Die äußeren Türen waren zerstört, und verschiedene innere Türen waren aus den Angeln gerissen.

Eingeschossiges Holzfachwerkhaus (Bungalowtyp)

4.34 Zwei eingeschossige Holzhäuser vom sog. »Bungalowtyp« wurden auf Betonfundamenten errichtet, die zu ebener Erde am Ort gegossen worden waren. Sie hatten herkömmliche Grundrisse, nur enthielt jedes einen Schutzraum, nämlich das Badezimmer, dessen Wände, Fußboden und Decke aus Stahlbeton bestanden und das eine Drucktür und drucksichere Fensterläden hatte.

4.35 Als eines dieser Häuser einem Maximaldruck von 0,35 atü ausgesetzt wurde, entstand völlige Zerstörung, jedoch war der Schutzraum überhaupt nicht beschädigt. Obwohl der Verschlußriegel am drucksicheren Fensterladen nachgab und den Laden unbefestigt ließ, blieb das Fenster unbeschädigt. Das Dach wurde abgerissen und die Balken gespalten und gebrochen. Die Giebelwände wurden nach außen gedrückt und fielen zu Boden. Ein Teil der Vorderwand blieb stehen, neigte sich aber aus der Richtung der Explosion fort.

4.36 Das andere Haus gleichen Typs, einem Überdruck von 0,12 atü ausgesetzt, wurde nicht allzu schwer beschädigt, und es hätte leicht wieder bewohnbar gemacht werden können. Die Fenster waren entzwei, Türen aus den Angeln gehoben, und die Gipswände und Decken waren schwer beschädigt. Der Hauptschaden an der Konstruktion waren ein gebrochener mittlerer Stützbalken und die Zerstörung des Rahmenwerkes. Außerdem war das Dach über dem überdeckten Eingang 15 cm von seinen Stützen hochgehoben worden.



Bild 4.35 Haus im Bungalow-Stil nach der Kernexplosion (0,35 atü Überdruck)

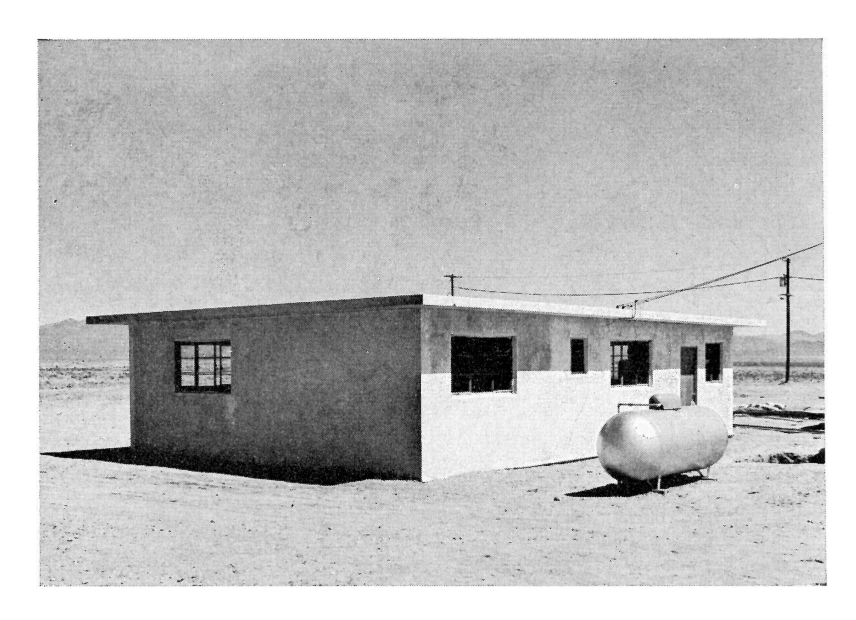


Bild 4.37 Haus aus Stahlbetonfertigteilen vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada

Eingeschossiges Haus aus Fertigbetonteilen

4.37 Ein anderer Wohnhaustyp, der 1955 erprobt wurde, war ein eingeschossiges Haus, das aus vorgefertigten Leichtbetonaußen- und Zwischenwandplatten gefertigt war, die durch angeschweißte Stahlschellen verbunden waren. Ähnlich waren die Dachplatten mit den Wänden durch besondere eingelassene und vermörtelte Verbindungsstücke verbunden. Die Wände fanden ihren Halt an Betonpfeilern und einer Betonplatte, die am Ort auf einer verdichteten Aufschüttung gegossen war, nachdem die Wände aufgestellt waren. Die Bodenplatte war durch verstärkende Rundeisen fest mit den Wänden verbunden. Die Rundeisen wurden durch hakenförmige Schraubenbolzen zusammengehalten, die mittels in die Wände eingelassener Gewindestücke die Verbindung herstellten. Der Gesamtentwurf entsprach den in Kalifornien geltenden Vorschriften über erdbebensichere Konstruktionen.

4.38 Dieses Haus hielt gut stand, sogar bei einer Überdruckspitze von 0,35 atü, und hätte durch Erneuerung der zerstörten oder beschädigten Türen und Fenster wieder bewohnbar gemacht werden können.

4.39 Die Dachplatten an der Vorderseite des Hauses waren anscheinend von ihren Stützen hochgehoben worden, aber es genügte nicht, um irgendeine Verbindung zu beschädigen. Einige Wände waren leicht gerissen, andere zeigten Spuren geringer Bewegung. An bestimmten Stellen der Plattenverbindungen war der Beton abgeplatzt,

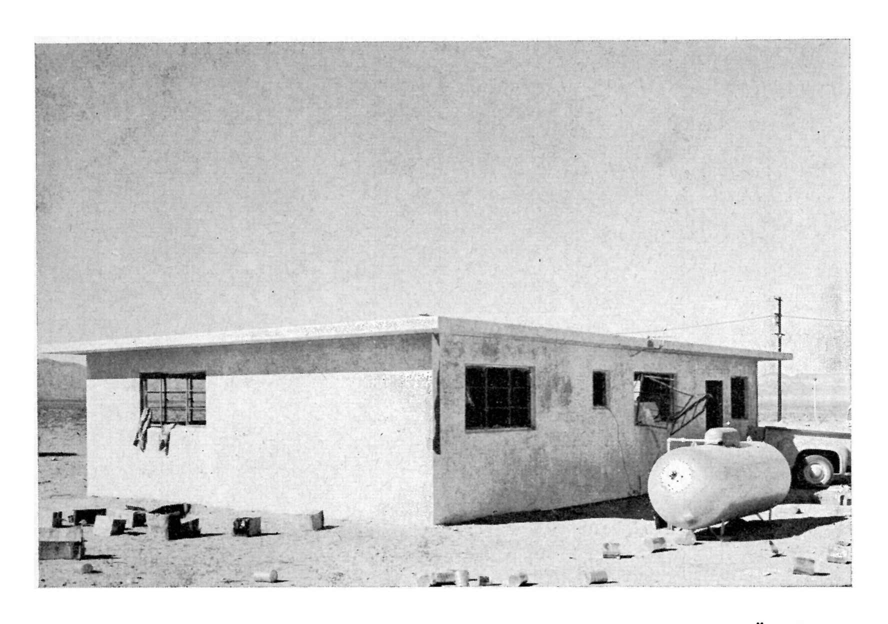


Bild 4.38 Haus aus Stahlbetonfertigteilen nach der Kernexplosion (0,35 atü Überdruck). Der durch das Haus abgeschirmte Gasbehälter blieb im wesentlichen unbeschädigt.

so daß die Verbindungsstücke freigelegt wurden. Die stählernen Fensterrahmen waren etwas verbogen, aber sie blieben an ihrem Platze.

4.40 Wie man aus Vorstehendem entnehmen kann, hat das Haus aus Betonfertigteilen durch die Überdruckspitze von 0,12 atü relativ wenig Schaden erlitten. Das Fensterglas war überall zerbrochen, die Türen waren aus den Angeln gehoben und zerstört wie bei den anderen Häusern, die dem gleichen Luftdruck ausgesetzt waren. Aber abgesehen hiervon und von dem verbogenen stählernen Fensterrahmen war der einzige bedeutende Schaden das Abplatzen des Betons an den Verbindungsschellen.

Eingeschossiges gemauertes Haus mit Verstärkungen

4.41 Der letzte Haustyp des Versuchs vom Jahre 1955 war ebenfalls erdbebensicher konstruiert. Die Sohle bestand aus einer Betonplatte, die an Ort in Erdgleiche gegossen war. Die Außen- und Zwischenwände waren aus leichten, 20 cm dicken Mauersteinen gebaut und durch senkrechte Bewehrungsstähle verstärkt, die in der Sohle verankert waren. Die Wände waren mit waagerechten Stahleinlagen in zwei Lagen verstärkt, und die Öffnungen waren durch Stahlbetonstützbalken überspannt. Das Dach bestand aus leichten Betonfertigteilen, wie sie bei den Betonfertigteil-Häusern weiter oben beschrieben sind.

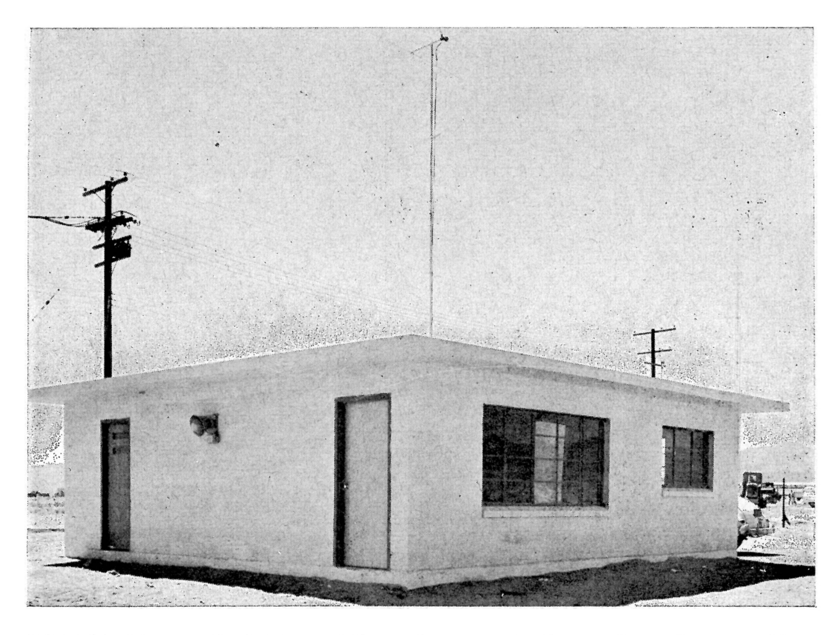


Bild 4.41 Haus aus Blocksteinen mit Verstärkungen vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada

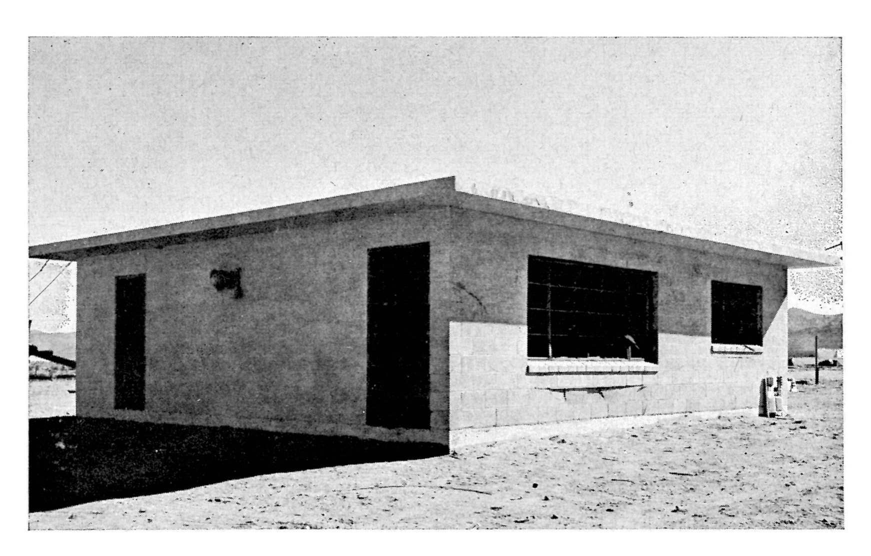


Bild 4.42 Haus aus Blocksteinen mit Verstärkungen nach der Kernexplosion (0,35 atü Überdruck)

4.42 Bei einem Spitzendruck von 0,35 atü wurden die Fenster zerstört und die Türen eingedrückt und zerstört. Die stählernen Fensterrahmen wurden verbogen, blieben aber fest an ihrem Platz. Das Haus erlitt relativ geringe Schäden an seiner Konstruktion und hätte mit wenig Kosten wieder bewohnbar gemacht werden können.

4.43 Es waren einige Anzeichen dafür vorhanden, daß sich die Dachplatten bewegt hatten, aber nicht genügend, um irgendwelche Verbindungen abzureißen. Die gemauerte Wand unter dem großen Fenster (Bild 4.42) wurde ungefähr 10 cm auf der Betonsohle nach innen gedrückt; dies schien durch das Fehlen einer Verdübelung zwischen den Wänden und dem Boden unter den Fensteröffnungen bedingt zu sein. Einige Risse entstanden in der Wand über demselben Fenster, wahrscheinlich durch ungenaues Einsetzen des Stahlbetonsturzes und durch das Auswechseln einer Stahlrohrstütze in der Mitte des Fensters verursacht.

4.44 Der gleiche Haustyp, einem Spitzendruck von 0,12 atü ausgesetzt, erlitt kaum mehr Schaden als die übliche Zerstörung von Fenstern und Türen. Der stählerne Fensterrahmen blieb an Ort und Stelle, war aber verbogen, und an den Verbindungsschellen war ein wenig Beton abgeplatzt. Im ganzen war der Schaden gering, das Haus hätte leicht repariert werden können.

Wohnwagen

4.45 Bei dem Versuch von 1955 wurden 16 Wohnwagen verschiedener Typen, die zur Verwendung als »fahrbare Wohnhäuser« bestimmt waren, der Druckwelle ausgesetzt. Die Parkplätze für Wohnwagen und die Lager der Händler liegen im all-

gemeinen am Stadtrand, deshalb stellte man die zu erprobenden Wohnwagen in größerer Entfernung vom Nullpunkt auf. 9 Wohnwagen standen an der Stelle, wo der Überdruck 0,12 atü betrug, und die anderen 7 bei 0,07 atü. Sie waren in verschiedenen Winkeln zu der Ausbreitungsrichtung der Luftdruckwelle aufgestellt.

4.46 Bei dem höheren Überdruck wurden zwei Wohnwagen durch die Explosion umgeworfen. Einer der beiden stand ursprünglich mit der Breitseite zur Luftdruckwelle, während der zweite, der in einem Winkel von 45 Grad stand, viel leichter gebaut war. Alle anderen Wohnwagen an beiden Standorten blieben stehen. Im ganzen waren die Schäden nicht schwerwiegend; sie waren bei den einzelnen Wagen, die dem gleichen Druck ausgesetzt waren, verschieden. Das lag an den unterschiedlichen Bauarten, Befestigungsarten, Stärken und Formen der Metallkarosserie, Nietenabständen und Fenstergrößen.

4.47 Von außen zeigten manche der Wohnwagen Ausbeulungen in den Wänden oder am Dach und ein gewisses Maß an Durchbiegungen. Es gab aber wenig Bruch. Die meisten Fenster waren zerbrochen, aber es gab keine oder nur wenig Glasscherben im Innern, besonders in den Wagen, die innen Jalousien angebracht hatten. Wo keine Jalousien oder Fensterläden vorhanden waren und besonders dort, wo große Fenster waren, wurden innen Glasscherben gefunden.

4.48 Das Innere der Wohnwagen war gewöhnlich in Unordnung durch zerbrochene Wandverkleidungen, zerbrochene und umgefallene Möbelstücke, Schränke, Vitrinen und Garderoben, die losgerissen und beschädigt waren. Öfen, Kühlschränke und Zeitungen blieben an ihren Plätzen, und die Fußböden waren offensichtlich unbeschädigt. Die Installation war im allgemeinen nach der Explosion benutzbar. Infolgedessen wären die Wohnwagen für den Notfall bewohnbar gewesen, nachdem man die Möbel wieder hingestellt, die Schränke repariert, die Fenster gedichtet und die Trümmer fortgeschafft hätte.

4.49 Bei dem Standort mit 0,07 atü Überdruck waren einige Fenster zerbrochen, aber kein schwerer Schaden angerichtet. Die wichtigsten Reparaturen zur Wiederbenutzbarmachung der Wohnwagen wären Fensterverglasung oder sonstige behelfsmäßige Fensterabdichtung.

Nahrungsmittel

4.50 Um die Wirkung einer Kernexplosion auf Lebensmittel festzustellen, wurden bei den Versuchen von 1955 über 90 verschiedene Lebensmittel der Explosion ausgesetzt. Die Auswahl richtete sich nach dem Durchschnitt der amerikanischen Ernährungsweise, damit alles einbegriffen wurde, was am häufigsten oder in größten Mengen verbraucht wurde. Ungefähr die Hälfte der Produkte waren Dauerwaren, wie Mehl und Zucker, leichter verderbliche Lebensmittel, wie Kartoffeln, Früchte und verarbeitetes Fleisch sowie schnellverderbliche Lebensmittel, wie frisches Fleisch und gefrorene Lebensmittel. Die andere Hälfte bestand aus Lebensmitteln, die in Metall- oder Glasbehältern durch Hitze haltbar gemacht waren. Zusätzlich zu der



Bild 4.55a *Stahlgerippe-Industriebau etwa 565 m vom Nullpunkt in Hiroshima. Beachte die hölzernen Balken*

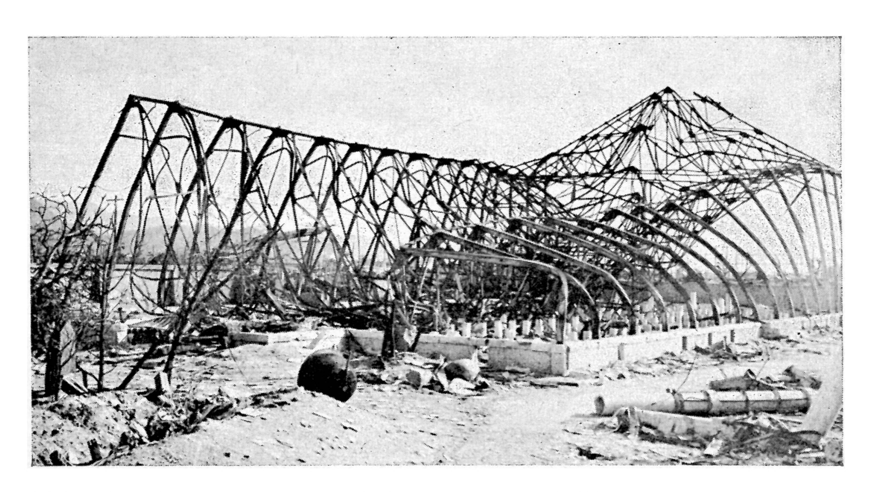


Bild 4.55b *Eingeschossiges leichtes Stahlgerippebauwerk 1300 m vom Nullpunkt in Hiroshima; Teilschaden durch Luftdruck, Einsturz durch darauffolgendes Feuer*

Vielfalt der Nahrungsmittel hat man eine Anzahl verschiedener Verpackungsmaterialien und -methoden des Klein- und Großhandels erprobt.

4.51 Lebensmittelproben wurden in Entfernungen von 400 m bis ungefähr 24 km vom Nullpunkt der Explosion ausgesetzt. In einigen Fällen war vor allem beabsichtigt, die Wirkung der Anfangsstrahlung oder der Rückstandsstrahlung aus dem radioaktiven Niederschlag zu untersuchen. Die hier erörterte Untersuchung beschränkt sich aber auf die Druckwirkung.

4.52 Frische Nahrungsmittel, wie Kartoffeln, Äpfel und Zwiebeln, in den üblichen leichten Kisten verpackt, wurden angeschlagen und gequetscht. Davon abgesehen gab es wenig unmittelbaren Druckschaden. Es entstand wenig Verlust (wenn überhaupt) bei den Glas- und Metallgefäßen durch hohen Überdruck, obgleich einige durch scharfe Splitter, hauptsächlich herumfliegendes Glas, durchbohrt wurden. Der Schaden an verpackten Lebensmitteln entstand hauptsächlich dadurch, daß sie von den Küchenregalen herunterfielen und die Glasbehälter zerbrachen. Wo die Büchsen oder Gläser in Regalen im Keller aufbewahrt wurden, war der Schaden unbedeutend, selbst wenn das Haus zerstört war.

4.53 Behälter aus weichem Material, wie Papier, Polyäthylen (Plastik) oder Pappe, waren durch herumfliegende Trümmer schwer beschädigt worden. In diesen Fällen waren die Nahrungsmittel oft gefährlich mit Glassplittern durchsetzt. Wo entsprechender Schutz vorhanden war, waren die direkten oder indirekten Druckschäden nicht schwerwiegend.

Industriebauten

Japanische Erfahrungen

4.54 In Nagasaki waren viele Bauten für industrielle Zwecke üblichen Typs vorhanden, bestehend aus einem Stahlskelett mit Dach und Seitenwänden aus Wellblech oder Asbestzement. In einigen Fällen waren Gleise für Laufkräne vorhanden, aber die Kräne waren für gewöhnlich nicht sehr leistungsfähig. Im allgemeinen war die Konstruktion der Industriebauten mit denen in den Vereinigten Staaten zu vergleichen.

4.55 Schwerer Schaden an diesen Bauten zeigte sich bis zu einer Entfernung von etwa 1,85 km vom Nullpunkt. Verhältnismäßig nahe dem Nullpunkt waren die Gebäude im ganzen umgeworfen worden, und in größeren Entfernungen neigten sie sich im allgemeinen vom Ausgangspunkt des Druckes fort (Bild 4.55a und b). Die langen, schmalen Stützen boten den seitlichen Belastungen wenig Widerstand. Manchmal gaben die Stützen nach, weil die seitliche Belastung sie verbog und außerdem die Belastung von oben etwas durch das Auftreffen der Druckstoßwelle auf das Dach verstärkt wurde. Das verursachte Knicken und manchmal völligen Zusammensturz. Die seitliche Druckbelastung auf die der Explosion zugewandten Seite des Gebäudes verbog die Dachbinder.

4.56 Man stellte einen Unterschied in der Wirkung auf das Gerippe fest, je nachdem, ob für Dachhaut und Seitenwände ein sprödes Material, wie Asbestzement, oder ein Material von großer Elastizität, wie Wellblech, verwendet worden war. Asbestzement brach schneller und gestattete dadurch einen schnelleren Druckausgleich, infolgedessen gab es weniger Schäden am Gerippe.

4.57 Die Brände verursachten schwere Schäden an ungeschützten Stahlteilen, so daß es unmöglich war, genau festzustellen, was die Druckwelle angerichtet hatte. Im allgemeinen waren die Stahlskelette stark verbogen und wären unbrauchbar gewesen, selbst wenn Material für Reparaturen von Seiten und Dach vorhanden gewesen wäre.

4.58 In manchen Industriebauten benutzte man Holzbinder als Dachträger. Diese waren infolge schwächerer Rahmenwirkung und Knotenpunktausbildung empfindlicher gegen Druck und brannten sofort aus. Betonstützen wurden in einigen Fällen zusammen mit Stahlbindern verwendet; solche Stützen schienen gegen Ausbeulen widerstandsfähiger zu sein als Stahl.

4.59 Schäden an Maschinen (Bild 4.59) wurden durch Trümmer verursacht, die von einstürzenden Dächern und Seitenwänden herrührten, durch Brände in Bauten in Holzkonstruktion und durch Verschieben und Umwerfen infolge Zerstörung des



Bild 4.59 Schaden an Maschinen in einem Stahlgerippebauwerk, 965 m vom Nullpunkt in Hiroshima

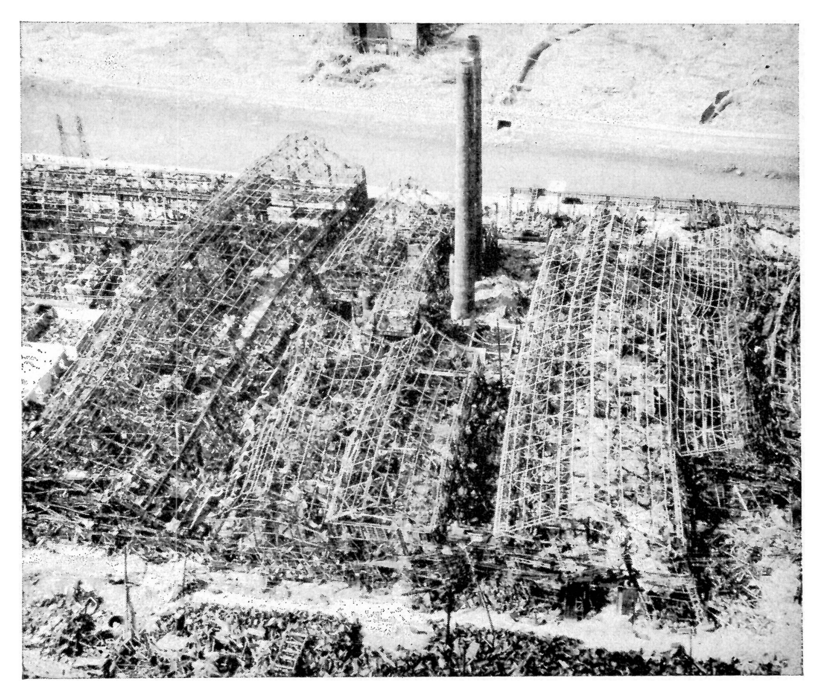


Bild 4.60 a Zerstörtes Industriegelände mit stehengebliebenen Schornsteinen, 820 m vom Nullpunkt in Nagasaki

Gebäudes. In vielen Fällen wurden die Maschinen mit Treibriemen betrieben so, daß das Verbiegen des Gebäudes die Maschinen von ihrem Fundament riß, sie beschädigte oder umwarf.

4.60 Schornsteine, besonders solche aus Stahlbeton, waren recht widerstandsfähig gegen Druck (Bild 4.60a). Durch ihre Form sind sie ausschließlich der Winddruckbelastung ausgesetzt, und ihre lange Schwingungsperiode macht sie weniger empfindlich gegen die Druckwelle als andere Bauten. Das Beispiel eines sehr schwer beschädigten Stahlbetonschornsteines ist in Bild 4.60b gezeigt. Im ganzen widerstanden gut gebaute Ziegelschornsteine dem Druck besser als solche aus Stahl.

Versuche in Nevada 1955

4.61 Drei Typen von Metallbauten in Standardkonstruktion, wie sie für verschiedene gewerbliche und industrielle Zwecke benutzt werden, wurden Überdruckspitzen von 0,22 und 0,084 atü ausgesetzt. Der Hauptzweck der Versuche in Nevada war, den Überdruck festzustellen, dem diese Bauten standhalten würden,



Bild 4.60 b *Runder, 18 m hoher Stahlbetonschornstein, 550 m vom Nullpunkt in Hiroshima. Das durch die Druckwelle verursachte Versagen entstand 4,6 m vom Fuße des Schornsteins*

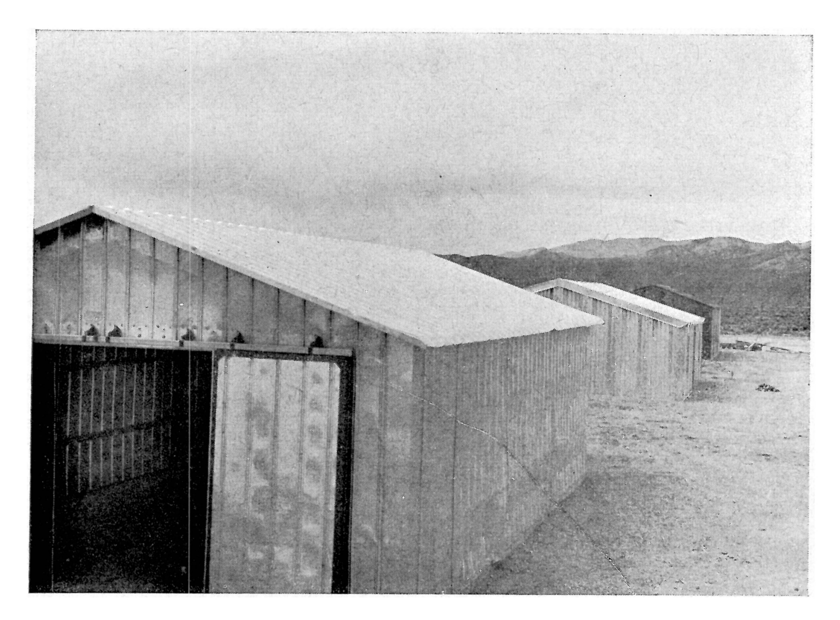


Bild 4.62a Starres Stahlgerippebauwerk vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada

d. h. ob man sie nach geringen Reparaturen wieder benutzen könnte. Außerdem sollten Erfahrungen gewonnen werden, auf Grund derer man standsicherere Bauten planen könnte.

Stahlskelett mit Aluminiumwandplatten

4.62 Der erste der Industriebauten hatte ein herkömmliches, starres Stahlskelett, das Bauingenieuren bekannt ist, mit Aluminiumplatten für Dach und Seitenwände (Bild 4.62a). Bei einem Überdruck von 0,22 atü wurde dieses Gebäude schwer beschädigt. Das geschweißte und genietete Stahlskelett blieb stehen, war aber stark durchgebogen und von den Betonsockeln weggerissen. Auf der der Explosion zugewandten Seite betrug die Abweichung 30 cm am Dachvorsprung (Bild 4.62b).

4.63 Die Aluminiumwandplatten waren mit einem großen Teil des stützenden Rahmenwerks von der Vorderseite abgerissen. Stahlträger und Plattenteile wurden nach hinten geschleudert, wobei sie Maschinen beschädigten. Die meisten Aluminiumplatten an den Seitenwänden und an der Rückwand blieben am Skelett sitzen. Ebenso waren die Platten an der hinteren Dachschräge noch an ihrem Platz, aber größtenteils von ihrer Befestigung gelöst.

4.64 Bei einer Überdruckspitze von 0,084 atü wurde das tragende Stahlskelett nur leicht verbogen. Die Aluminiumplatten an den Seiten und auf dem Dach waren nicht fortgerissen, obwohl sie von der Bolzenbefestigung an der Vorderseite der Stahl-

stützen und Träger abgerissen waren. Der Explosion zugewandte Wand- und Dachplatten waren nach innen gewölbt. Die mittleren Träger waren von ihren Befestigungen an den Stützen an der Vorderseite des Gebäudes losgerissen. Die Aluminiumplatten an den Seitenwänden waren leicht nach innen gebogen, aber an der Rückwand und der rückwärtigen Seite des Daches waren die Platten fast unverändert.

4.65 Wie eben gezeigt, können diese Bauten als reparierbar bezeichnet werden, vorausgesetzt, daß der Überdruck 0,07 atü nicht übersteigt. Bessere Widerstandsfähigkeit gegen Druck würde wahrscheinlich zu erreichen sein, wenn man insbesondere Verbesserungen bei der Herstellung des Rahmenwerks vorsieht. Bessere Befestigungen zwischen den Schwellen und Wandsockeln und verstärkter Widerstand gegen seitliche Belastung würden auch empfehlenswert sein.

Selbsttragende Konstruktion aus Stahlwandplatten

4.66 Ein Bau ohne innere Tragkonstruktion mit selbsttragenden Wänden und Dach aus leichten Stahlplatten (40 cm breit), die durch rinnenförmige, längsverlaufende Schlösser miteinander verbunden waren, stellte den zweiten Standard-Typ von Industriebauten dar. Der eine Bau, einem Maximaldruck von 0,22 atü ausgesetzt, wurde zerstört (Abb. 4.66b). Ein oder zwei Wandteile wurden 15 m weit fortgeschleudert, aber im allgemeinen blieben die verbogenen und verdrehten Gebäudeteile



Bild 4.62b Starres Stahlgerippebauwerk nach der Kernexplosion (0,22 atü Überdruck)

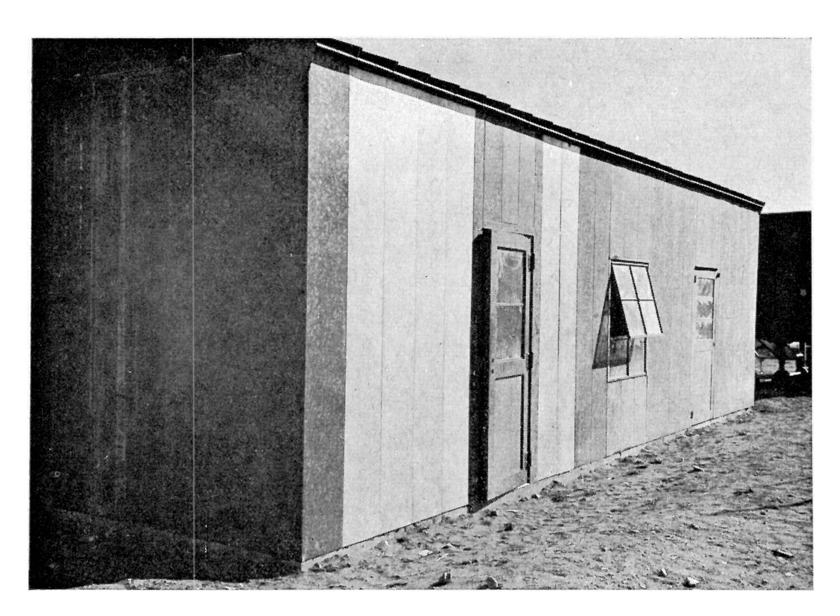


Bild 4.66a Äußeres einer selbsttragenden Konstruktion aus Stahlplatten vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada



Bild 4.66b Selbsttragende Konstruktion aus Stahlplatten nach der Kernexplosion (0,22 atü Überdruck)

ungefähr an ihrem ursprünglichen Platz. Die meisten Wandteile waren noch an ihren Befestigungsbolzen an den Seitenwänden und der Rückseite des Gebäudes befestigt. Das Dach war völlig zusammengefallen und lag auf den Maschinen im Innern.

4.67 Obwohl der Schaden bei 0,084 atü viel geringer war, war er zum Teil doch beachtlich. Die Platten an der Vorderseite waren 30 bis 60 cm von der Mitte aus nach innen gewölbt, aber die Rückwand und die Rückseite des Daches waren unbeschädigt. Im allgemeinen blieb die Dachkonstruktion intakt, abgesehen von leichter Verformung in der Mitte.

4.68 Es ergab sich, daß der Stahlwandplattenbautyp zu reparieren ist, wenn er höchstens 0,05 bis 0,07 atü ausgesetzt wird. Die Bauten sind leicht aufzustellen, aber sie halten unter Druck nicht besonders gut zusammen. Wenn man die wesentliche Einfachheit des Grundrisses erhalten will, wird es schwierig sein, Verbesserungen der Druckwiderstandsfähigkeit zu entwickeln.

Selbsttragende Konstruktion aus Wellblechwandtafeln

4.69 Der dritte Typ von Industriebauten war eine völlig rahmenlose Konstruktion aus starken, gewellten, 1,10 m breiten Platten aus 16er Stahlblech. Die Platten wurden an den Seiten von großen Spannbolzen zusammengehalten; an den Dach-

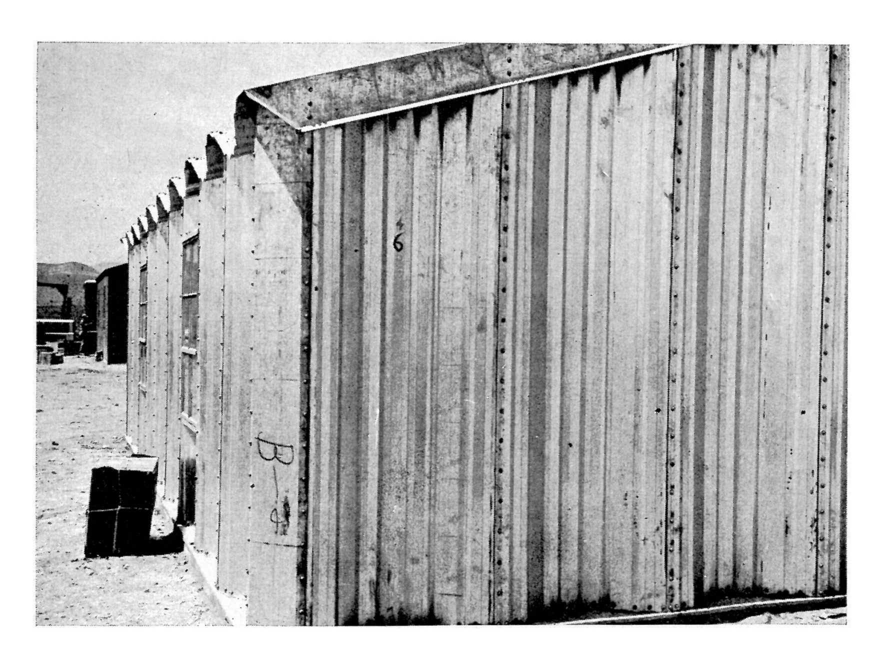


Bild 4.69 Selbsttragende Konstruktion aus Wellblechwandtafeln vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada

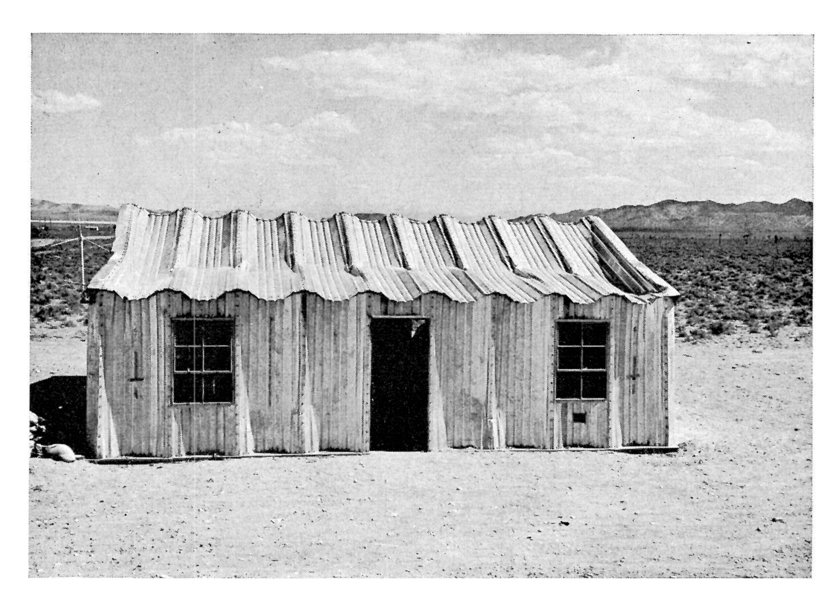


Bild 4.70 Selbsttragende Konstruktion aus Wellblechwandtafeln nach der Kernexplosion (0,22 atü Überdruck)

kanten und am First waren die Wandplatten durch Bolzen im Betonfundament befestigt. Der ganze Bau war selbsttragend, ohne Rahmen oder besondere Tragkonstruktion.

4.70 Bei einer Überdruckspitze von 0,22 atü wurde ein Bau dieses Typs ziemlich schwer beschädigt, aber alle Teile blieben miteinander verbunden, so daß der Bau für seinen Inhalt noch einen guten Schutz gegen die Witterung bot. Die Vorderseite des Daches wurde nach unten verbogen, 30 bis 60 cm im mittleren Teil, die Firstlinie wurde geringfügig verschoben. Die rückwärtige Dachseite schien im wesentlichen unbeschädigt (Abb. 4.70).

4.71 Die Vorder- und Seitenwände waren mehrere Zentimeter nach innen gewölbt, die Tür in der Vorderseite war weggebrochen. Alle Fenster waren irgendwie beschädigt, wenn auch einige Scheiben auf der Rückseite heil blieben.

4.72 Ein anderes Gebäude dieses Typs, 0,084 atü ausgesetzt, erlitt wenig baulichen Schaden. Das Dach zeigte an der Firstlinie Zeichen von Senkungen um 2,5 bis 5 cm, und es gab keine ersichtliche Wölbung im Dach oder an den Seitenwänden. Die meisten Fenster waren entzwei, gesprungen oder zersplittert. Ersatz des Fensterglases – soweit nötig – und einige andere geringfügige Reparaturen würden das Gebäude wieder völlig benutzbar gemacht haben.

4.73 Der selbsttragende Wellblechbau erwies sich als der gegen Druck widerstandsfähigste von allen untersuchten Typen. Es wird angenommen – vorausgesetzt, die Überdruckspitze übersteigt nicht 0,21 atü –, daß man diesen Bau nach leichten

Reparaturen fortlaufend benutzen könnte. Es wäre vorteilhaft, Türen und Fenster besser zu planen, damit z. B. die Gefährdung durch herumfliegende Glassplitter vermindert würde.

Kraftstoffbehälter

4.74 Große Behälter zur Kraftstoffspeicherung von rund 8000 m³ Fassungsvermögen befanden sich nicht in den japanischen Schadensgebieten und sind nicht in Nevada erprobt worden. Jedoch sind im April 1947 bei dem Unglück in Texas City mehrere Tanklager durch die Druckwelle, herumfliegende Trümmer und Brand ernstlich beschädigt worden. Öllagertanks, besonders leere, erhielten schwere Druckstoßschäden durch den Überdruck, den man etwa mit 0,21 bis 0,28 atü annimmt, da die Explosion Druckwellen erzeugte, die ähnlich waren wie die von Kernwaffen mit 2–4 kt Explosionswert. Die große Brandgefahr, die in solchen Tanks gelagerter Brennstoff darstellt, ist klar aus Bild 4.74a zu ersehen, die sowohl die Druck- als auch die Brandschäden zeigt. Bild 4.74b zeigt geringe Druckstoßschäden und einige Splitterschäden an den Lagertankwänden.



Bild 4.74a *Schäden durch Druckstoß und Feuer in Texas City, 16./17. April 1947. Vordergrund 1050 m vom Explosionspunkt entfernt*

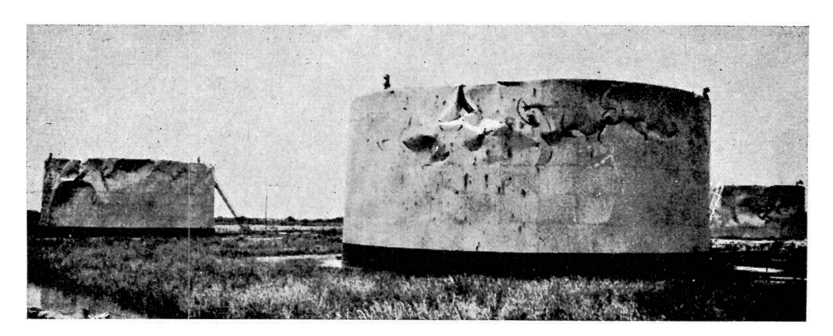


Bild 4.74b Schäden durch leichte, umherfliegende Teile und Druckstoß an Öllagertanks, 1125 m von der Explosion in Texas City, 16./17. April 1947

Schwere Maschinen

4.75 Es ist vorstehend (Abschn. 4.59) schon von den Schäden an Maschinen in Japan gesprochen worden. Trotzdem wurde 1955 bei den Versuchen in Nevada die Empfindlichkeit schwerer Werkzeugmaschinen und ihrer Einzelteile durch eine Kernexplosion erprobt, um Informationen zu gewinnen, die für das Verteidigungsprogramm von besonderem Interesse waren. Zu diesem Zweck wurde eine Anzahl von Maschinen auf einer Betonplatte so verankert, wie es guter industrieller Baupraxis entsprach. Zwei Drehbänke (Gewicht etwa 3,15 t und 5,4 t) und zwei horizontale Fräsmaschinen (3,15 t und 4,5 t) wurden einem Überdruck von 0,7 atü ausgesetzt. Eine Schutzwand aus Betonblöcken, 20 cm dick und 1,62 m hoch, wurde direkt vor den Maschinen errichtet, d. h. zwischen den Maschinen und dem Nullpunkt (Bild 4.75). Diese Schutzwand sollte die Außenmauer eines üblichen Fabrikgebäudes ersetzen und eine große Menge Trümmer und Splitter schaffen.

4.76 Von den vier Maschinen wurden die drei leichtesten von ihren Fundamenten losgerissen und erlitten beträchtlichen Schaden (Bild 4.76a). Die vierte (Gewicht 5,4 t), die man als einzige wirklich schwere Maschine ansah, kam ohne Schaden davon (Bild 4.76b). Aus dieser Beobachtung schloß man, daß eine richtig verankerte Werkzeugmaschine von wirklich schwerer Bauart Überdrücke von 0,7 atü oder mehr ohne wesentliche Schäden überstehen könnte.

4.77 Außer den direkten Wirkungen der Druckwelle war noch beträchtlicher Schaden durch Trümmer und Splitter entstanden. Diese stammten, wie erwartet, aus der völligen Zerstörung der Betonblockmauer. Empfindliche Mechanismen und Ansatzstücke, die gewöhnlich an der Außenseite der Maschine sitzen und ungeschützt sind, litten besonders schwer. Getriebe, Getriebekästen, Handventile und Kontrollhebel waren abgebrochen und Treibriemen gerissen. Die meisten Splitterschäden hätten jedoch mit verfügbaren Ersatzteilen leicht repariert werden können, da größere Montagearbeiten nicht nötig waren.

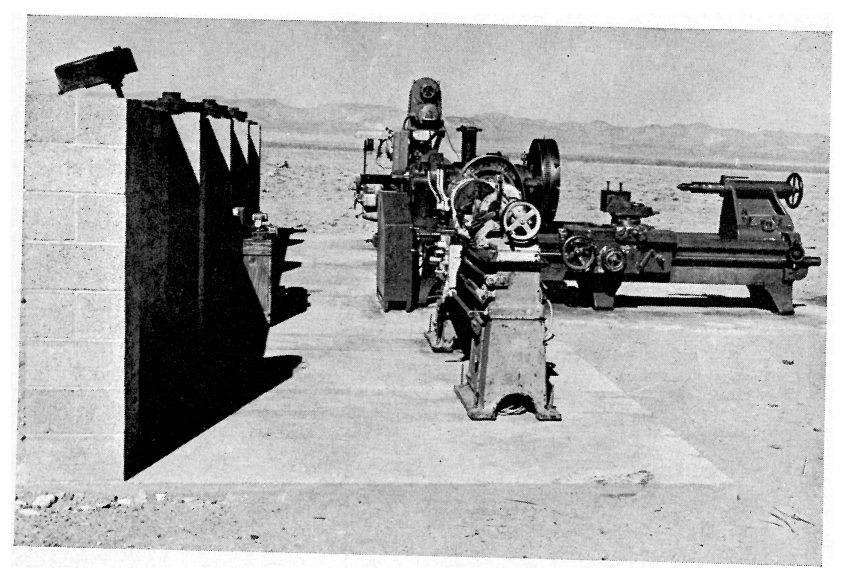


Bild 4.75 Maschinen hinter Schutzwand aus Betonblöcken vor der Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada

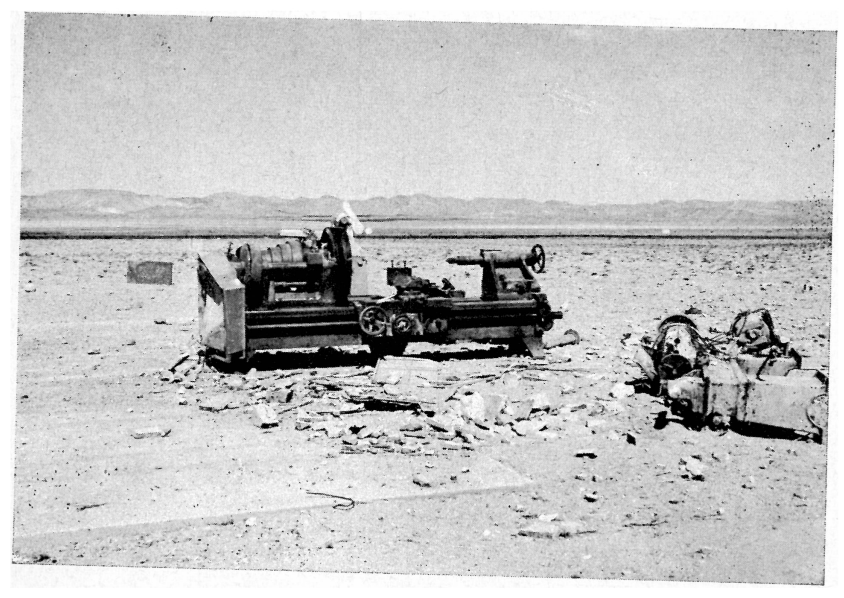


Bild 4.76a Maschinen nach der Kernexplosion (0,7 atü Überdruck)

4.78 Hinter dem zweigeschossigen Backsteinhaus in der Überdruckzone von 0,35 atü (Abschn. 4.30) wurde eine hydraulische 200-t-Presse im Gewicht von 22 t aufgestellt. Der Standort wurde so gewählt, daß er am besten die tatsächlichen Bedingungen in einer Fabrik darstellte. Dieses ungewöhnlich hohe (5,80 m) und schmale Aggregat zeigte kaum Druckstoßschäden, obwohl das Backsteinhaus beschädigt war. Es ist wahrscheinlich, daß das Haus etwas Schutz vor der Druckstoßwelle bot. Außerdem hatten die Splitter bei der erzeugten Druckstoßwelle keine hohen Geschwindigkeiten. Soweit die Maschine kleinere Schäden erlitten hatte, waren sie wahrscheinlich von fallenden Trümmern des Hauses verursacht.

4.79 An dem Standort mit 0,21 atü waren 2 leichte Industriebauten vom schon früher beschriebenen Standardtyp errichtet worden. In jedes stellte man eine ungefähr 1,35 t schwere Vertikal-Fräsmaschine, ein Druckgefäß von 189 l Kapazität aus rostfreiem Stahl, rund 1,8 t schwer, und einen stählernen Dampfkessel, ungefähr 0,76 m Durchmesser, 1,52 m hoch und 2,75 m lang. Beide Gebäude litten beträchtlich durch den Druckstoß (Abschn. 4.62), aber die Einrichtung erlitt keinen arbeitshemmenden Schaden. In einem Fall fiel der zusammenbrechende Bau auf die Fräsmaschine und brach einen hervorstehenden Teil ab.

4.80 Es muß bemerkt werden, daß der Schaden an Maschinen bei den Versuchen im Jahre 1955 wahrscheinlich geringer war als in Japan bei dem gleichen Druck (Abschn. 4.59). Verschiedene Zerstörfaktoren, die in letzterem Falle vorhanden waren, fehlten bei den Versuchen in Nevada. Erstens waren die Bedingungen so, daß es

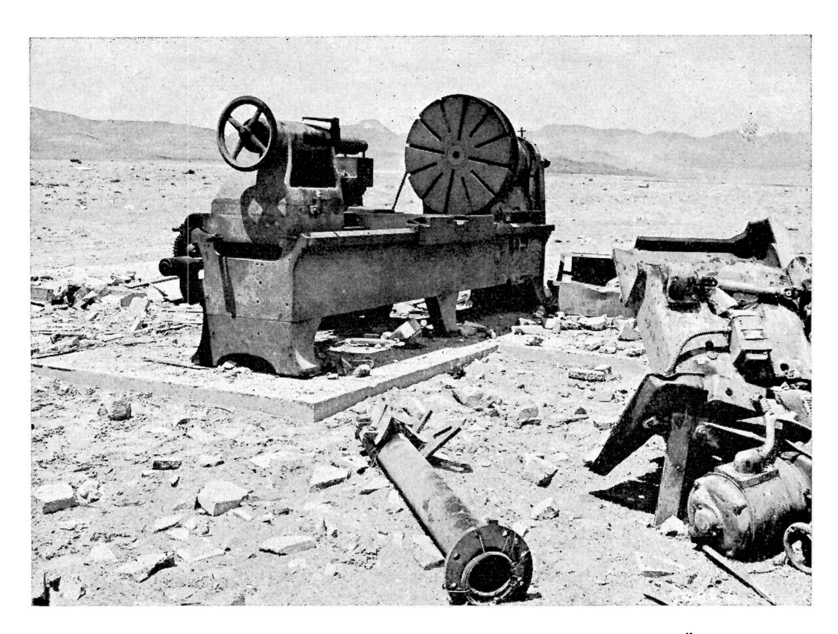


Bild 4.76b Hochleistungsdrehbank nach der Kernexplosion (0,7 atü Überdruck)

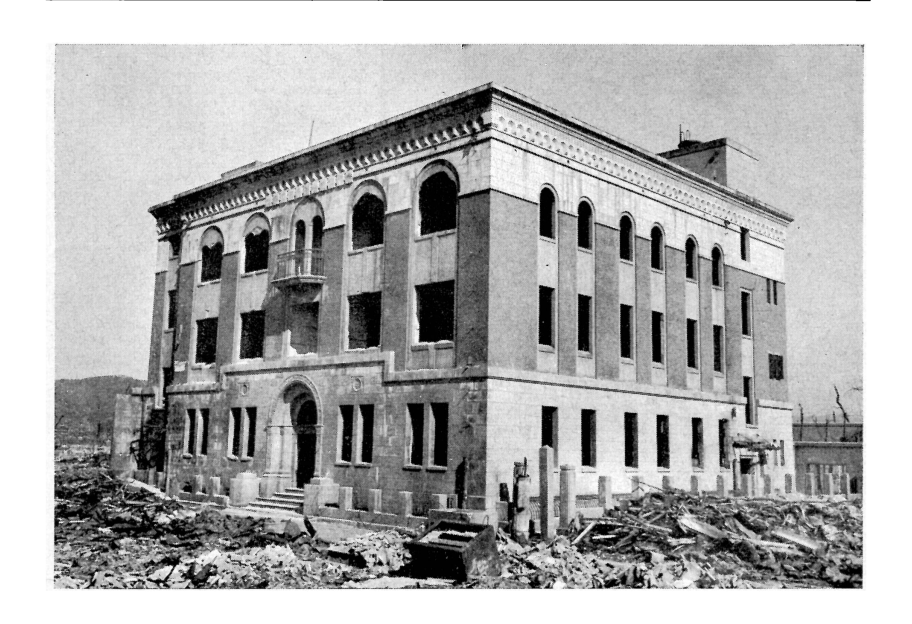




Bild 4.82a *Oberes Bild: Erdbebensicherer Stahlbetonbau; Fensterläden wurden durch Druckstoß nach innen gedrückt, und das Innere brannte aus (195 m vom Nullpunkt in Hiroshima).*

Unteres Bild: Ausgebranntes Innere eines ähnlichen Bauwerks

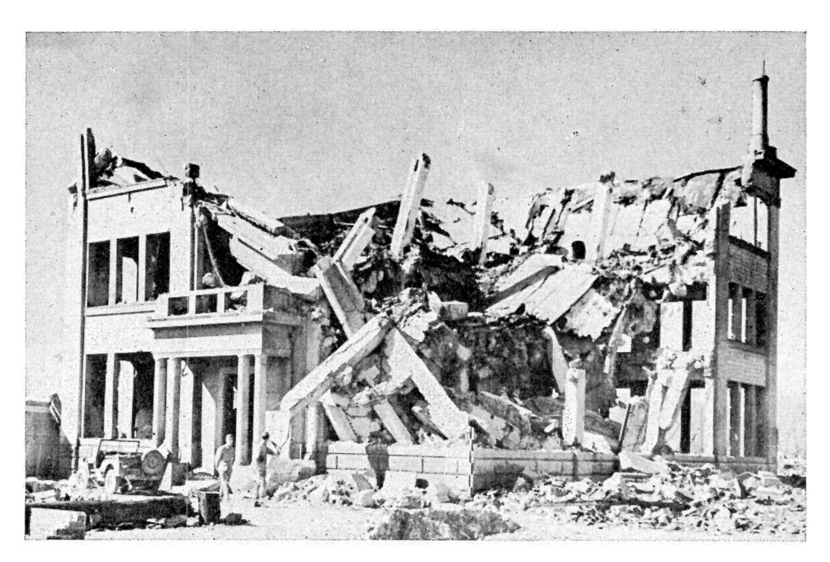


Bild 4.82 b Dreistöckiger Stahlbetongerippebau. Wände waren 33 cm dicke Backsteinteile mit großen Fensteröffnungen (etwa 210 m vom Nullpunkt in Hiroshima).

keinen Brandschaden gab; zweitens waren sie nicht den Unbilden der Witterung nach der Explosion ausgesetzt. Außerdem war die Trümmermenge bei den Versuchen erheblich geringer als in den Industriebauten Japans.

Gewerbliche und Verwaltungsbauten

4.81 Gebäude, die für gewerbliche und Verwaltungszwecke benutzt werden, z. B. Banken, Büros, Krankenhäuser, Hotels und große Miethäuser, sind meist von festerer Konstruktion als gewöhnliche Wohn- und Industriebauten. Im wesentlichen sind alle durch Erfahrungen gesammelten Informationen über die Wirkung der Kernexplosionen auf solche mehrgeschossigen Gebäude aus den in Hiroshima und Nagasaki gemachten Beobachtungen gewonnen worden. Die unten gegebenen Beschreibungen gelten für drei allgemeine Typen, nämlich Stahlbetonbauten, Stahlgerippebauten und Gebäude mit tragenden Mauerwerkswänden.

Mehrgeschossige Stahlbetonbauten

4.82 Es gab viele solcher Häuser verschiedener Typen in Hiroshima und eine kleinere Anzahl in Nagasaki. Sie widerstanden dem Druckstoß verschieden, je nach Grundriß und Konstruktion, aber sie erlitten äußerlich bemerkenswert wenig Scha-

Bild 4.84a Eingedrücktes Dach eines Stahlbetonbauwerks 160 m vom Nullpunkt in Hiroshima

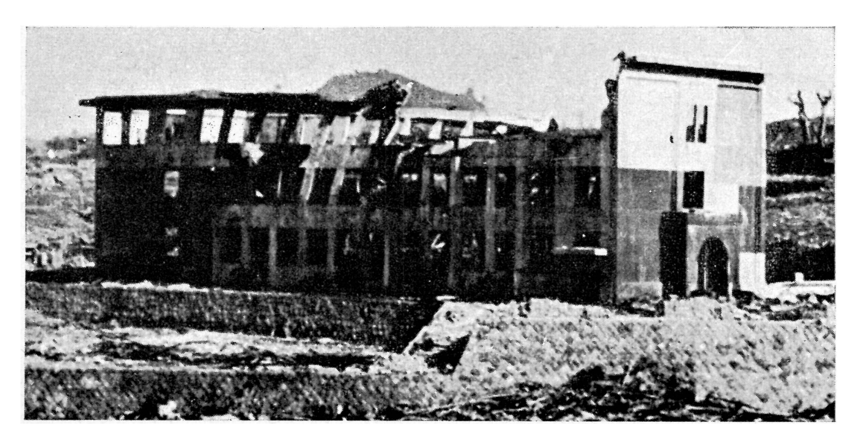


Bild 4.84b Wirkungen der waagerechten Belastung auf die der Explosion zugekehrte Wand, 645 m vom Nullpunkt in Nagasaki



Bild 4.84c Einstöckiges Stahlbetonbauwerk mit stählernen Dachbindern (420 m vom Nullpunkt in Nagasaki). Beachte den Widerstand der inneren Stirnwände, die als starre Scheiben wirkten.

den. Nahe am Nullpunkt allerdings waren das Innere und die Einrichtung infolge des durch Türen und Fenster eindringenden Druckstoßes und der anschließenden Brände beträchtlich beschädigt. Ein besonders fester Bau von erdbebensicherer Bauart, der rund 220 m vom Nullpunkt entfernt in Hiroshima stand, ist auf Bild 4.82a zu sehen. Obwohl die Außenmauern kaum beschädigt waren, waren das Dach eingedrückt und das Innere zerstört. Typischer für Stahlbetonbauten in den Vereinigten Staaten war das in Bild 4.82b gezeigte Gebäude bei ziemlich gleichem Abstand vom Nullpunkt. Dieses wurde stärker beschädigt als das von erdbebensicherer Bauart.

4.83 Ein Faktor, der die Druckresistenz der japanischen Stahlbetonbauten erhöhte, waren die nach dem schweren Erdbeben von 1923 herausgegebenen Konstruktionsrichtlinien. Die Höhe neuer Bauten wurde auf 30 m begrenzt, und sie waren so konstruiert, daß sie einem seitlichen Druck widerstehen konnten, der 10% der vertikalen Last betrug. Außerdem wurden die anerkannten Konstruktionsprinzipien der Versteifung durch Scheiben und Rahmenkonstruktion zur Erzielung dauernder Standfestigkeit angewandt. Die wichtigeren Gebäude wurden den Richtlinien folgend gut konstruiert und gebaut. Trotzdem wurden einige ohne Rücksicht auf die Erfordernisse der Erdbebensicherheit gebaut, und diese konnten der Druckwelle der Kernexplosion nicht so gut widerstehen.

4.84 Nahe am Nullpunkt war die vertikale Komponente des Druckstoßes von größerer Bedeutung. Daher fügte die abwärts wirkende Kraft den Dächern größeren Schaden zu, als von weitem in Erscheinung trat (Bild 4.84a). Das Dach

wurde heruntergedrückt und blieb je nach seiner Festigkeit entweder hängen oder brach vollständig zusammen. Der Rest des Gebäudes war wegen der geringeren waagerechten (seitlichen) Kräfte weniger beschädigt als ähnliche, weiter von der Explosion entfernte Gebäude. Weiter vom Nullpunkt entfernt, besonders in der Zone der Mach-Reflexion, waren die Folgen der horizontalen Belastung deutlich erkennbar (Bild 4.84b und c).

4.85 Außer dem Bruch der Dachplatten und dem seitlichen Verschieben der Wände werden zahlreiche andere Wirkungen der Druckwelle beobachtet. Dazu gehören: Durchbiegen und Brechen von Balken, Nachgeben von Stützen, Reißen äußerer Wandteile, Bruch von Bodenplatten (Bild 4.85a, b, c und d). Schwerer Schaden an untergehängten Zwischendecken, Putz und Trennwänden kam bis zu einer Entfernung von 2,75 km vom Nullpunkt vor. Das Fensterglas war im allgemeinen bis zu einer Entfernung von 6,1 km zerbrochen, in einigen Fällen bis zu 13 km.

4.86 Die verschiedenen, eben beschriebenen Wirkungen beziehen sich speziell auf Stahlbetonbauten, weil die Gebäude nicht als Ganzes zusammenfielen, so daß andere Folgen der Druckstoßbelastung beobachtet werden konnten. Es muß aber

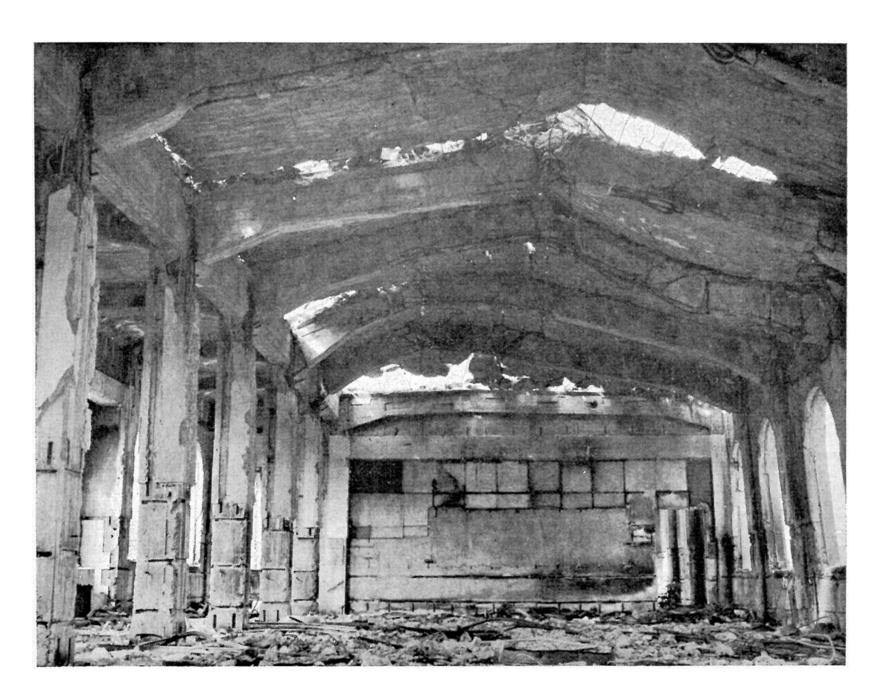


Bild 4.85a Durchbiegen und Bruch von Balken in Stahlbetongebäude (515 m vom Nullpunkt in Nagasaki)

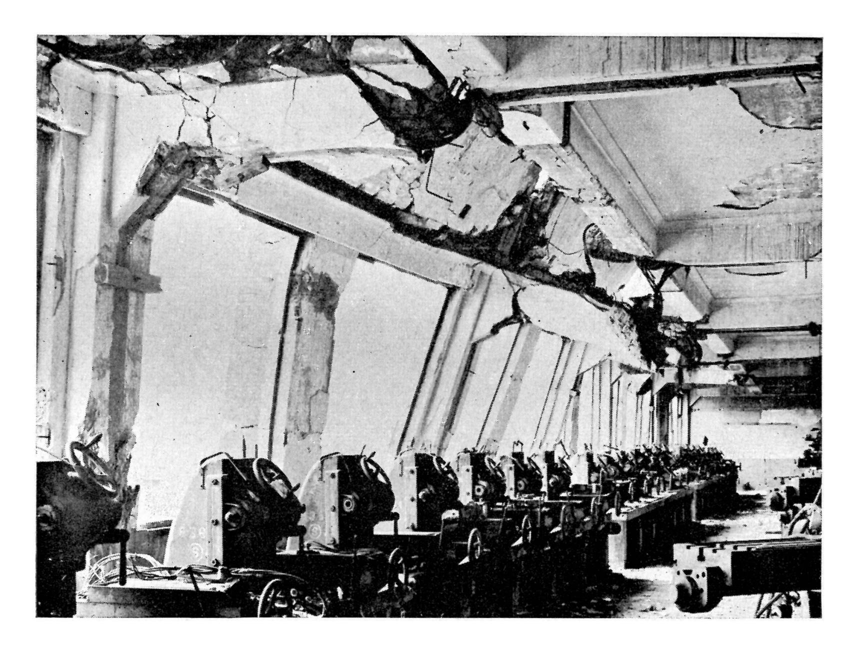


Bild 4.85b Mehrstöckiger Stahlbetongerippebau: Versagen von Stützen und Trägern (580 m vom Nullpunkt in Nagasaki)

darauf hingewiesen werden, daß ähnliche Schäden auch in anderen der unten beschriebenen Bauten entstanden.

Mehrgeschossige Stahlgerippebauten

4.87 Es gab in den japanischen Städten, die der Kernexplosion ausgesetzt waren, offensichtlich nur einen Stahlgerippebau mit mehr als zwei Geschossen. Das war ein fünfgeschossiges Haus in Nagasaki in einer Entfernung von 1,4 km vom Nullpunkt (Bild 4.87). Der einzige Teil des Hauses, der nicht als schwere Konstruktion angesehen werden konnte, war das Dach. Es bestand aus 10 cm dicken Stahlbetonplatten, getragen von ungewöhnlich leichten Stahlträgern. Das Eindrücken des Daches um 92 cm war der einzige bedeutende bauliche Schaden.

4.88 Stahlgerippebauten im gleichen Abstand von der Explosion waren ebenfalls unbeschädigt, und so ist ungenügendes Beweismaterial vorhanden, um irgendwelche Schlüsse auf die bessere Widerstandskraft des einen oder anderen Bautyps zu ziehen. Ein Beispiel von Schäden an einem zweigeschossigen Stahlgerippebau wird in Bild 4.88 gezeigt. Die schweren Wände des Bauwerks übertrugen ihre Last auf das Stahlgerippe, dessen Stützen zusammenbrachen.

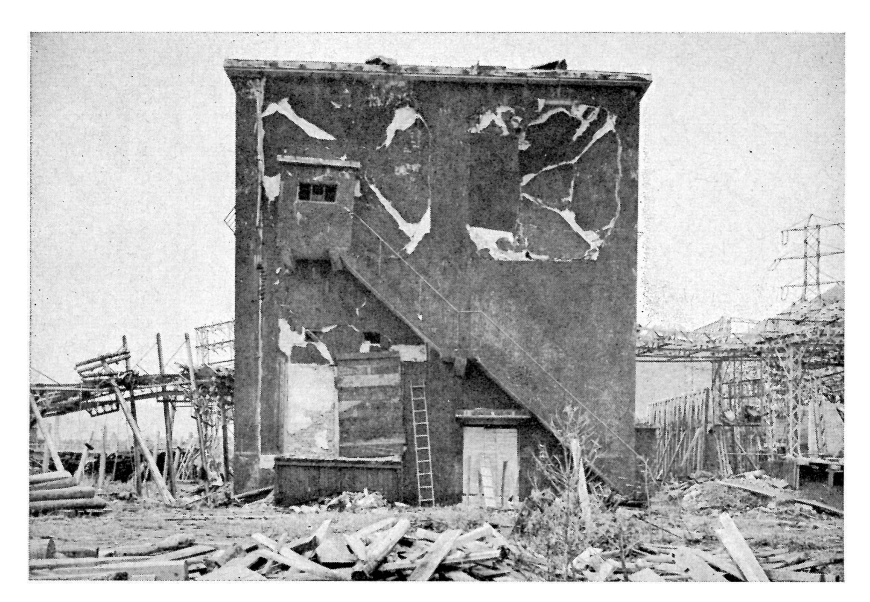


Bild 4.85c Stahlbetongerippebau: eingedrückte Betonwandplatten auf der der Explosion zugekehrten Seite (1095 m vom Nullpunkt in Nagasaki)

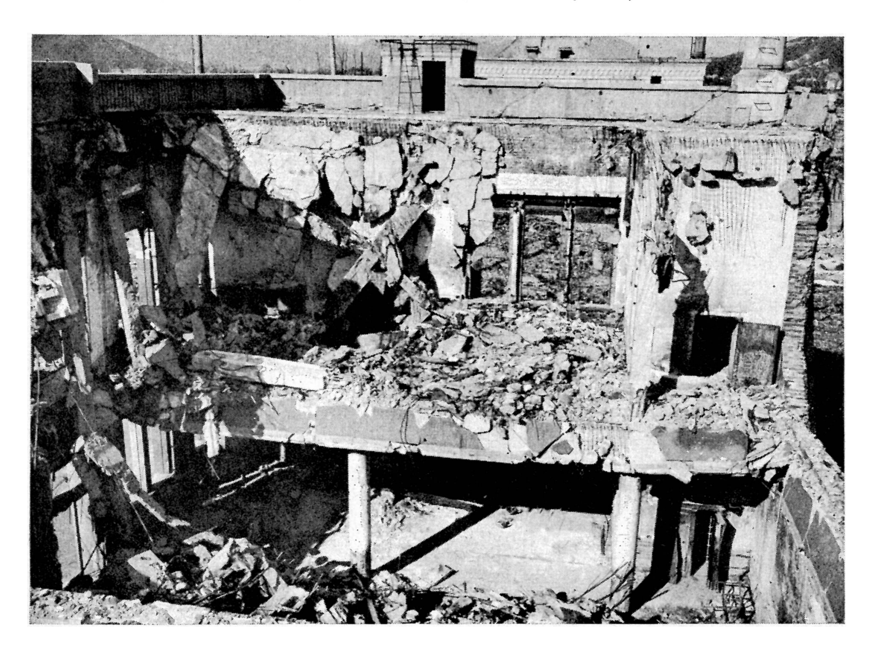


Bild 4.85d Stahlbetonbauwerk: eingedrückte Decken- und Sohlenplatten (160 m vom Nullpunkt in Hiroshima)

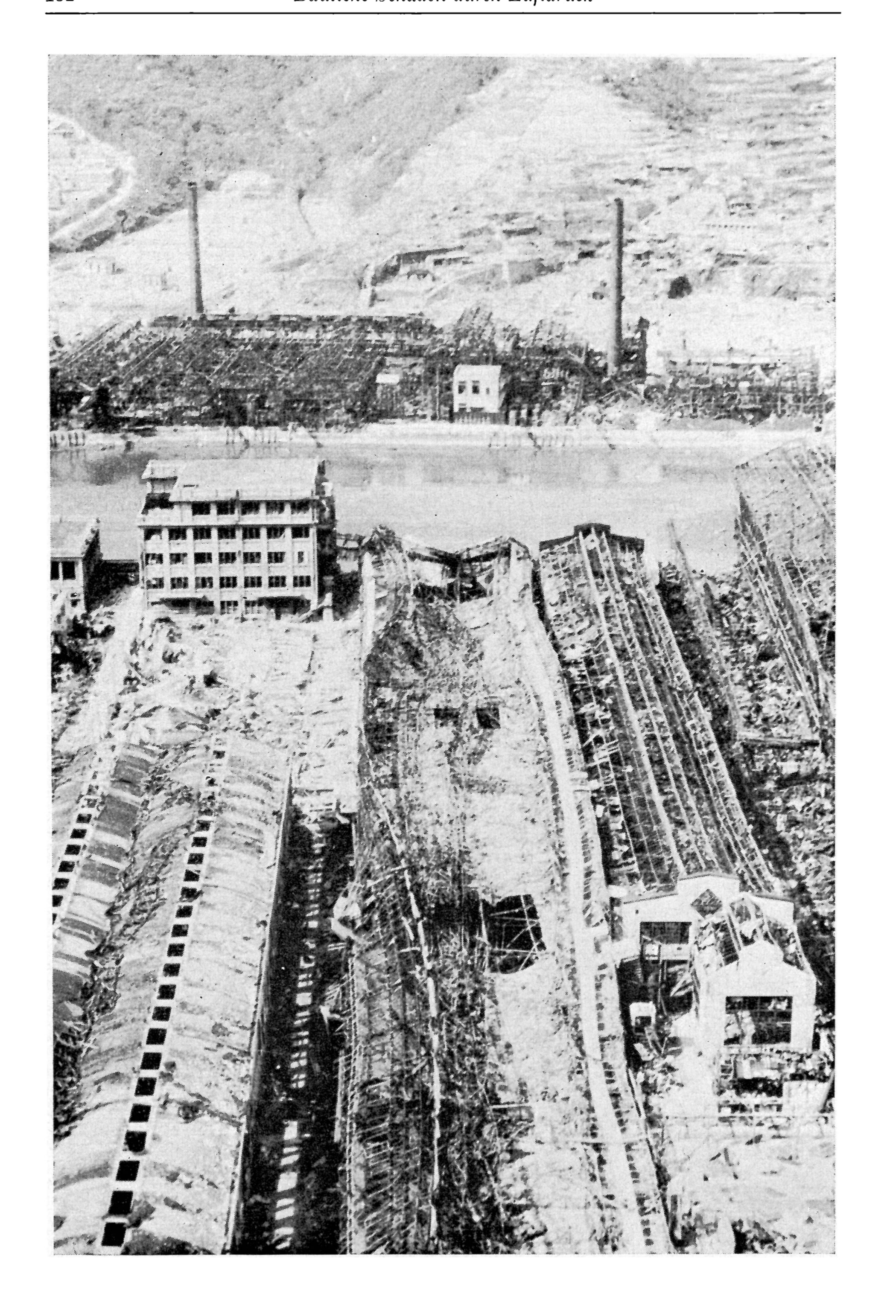


Bild 4.87 Hinten links mehrgeschossiger Stahlgerippebau (1370 m vom Nullpunkt in Nagasaki)



Bild 4.88 Zweigeschossiger Stahlgerippebau mit 18 cm dicken Stahlbetonwandtafeln (650 m vom Nullpunkt in Hiroshima). Die Säulen des ersten Geschosses knickten in der dem Nullpunkt abgekehrten Richtung weg, so daß das zweite Geschoß einstürzte.

Bauten mit tragenden Wänden

4.89 Kleine Bauten mit leichten, tragenden Wänden leisteten dem atomaren Druckstoß wenig Widerstand und fielen meist völlig zusammen. Große Bauten gleichen Typs, aber mit Querwänden und von etwas schwererer Konstruktion, waren widerstandsfähiger, wurden jedoch bei einer Entfernung bis knapp 2 km (1900 m)

vom Nullpunkt zerstört (Bild 4.89a und b). An der Verbindung von Quer- und Seitenwänden wurden Risse beobachtet, wenn die Häuser stehenblieben. Es ist offensichtlich, daß Bauten mit tragenden Wänden nur wenige der Eigenschaften besitzen, die sie gegen Einsturz schützen, wenn sie einer starken seitlichen Belastung ausgesetzt sind.

Brücken

4.90 In Hiroshima und Nagasaki gab es eine Anzahl verschiedener Brückenarten, die den Kernexplosionen ausgesetzt waren. Die Holzbrücken verbrannten in den meisten Fällen, aber Stahlträgerbrücken wurden relativ wenig beschädigt (Bild 4.90a, b und c). Eine Brücke, nur 82,50 m vom Nullpunkt entfernt (d. s. etwa 640 m vom Explosionspunkt), Stahlträgerkonstruktion mit Stahlbetonfahrbahndecke, zeigte keinerlei Schaden an der Konstruktion. Die Brücke war aber anscheinend durch die Belastung des Druckstoßes durchgebogen und zurückgefedert, wobei eine ganz geringe Verschiebung im ganzen auftrat. Andere Brücken in größerem Abstand vom Nullpunkt erlitten stärkere seitliche Verschiebungen. Eine Stahlbetonfahrbahn wurde von den Stahlträgern der einen Brücke emporgehoben, offensichtlich durch die Druckstoßwelle, die an der Wasseroberfläche unter der Brücke reflektiert worden war.

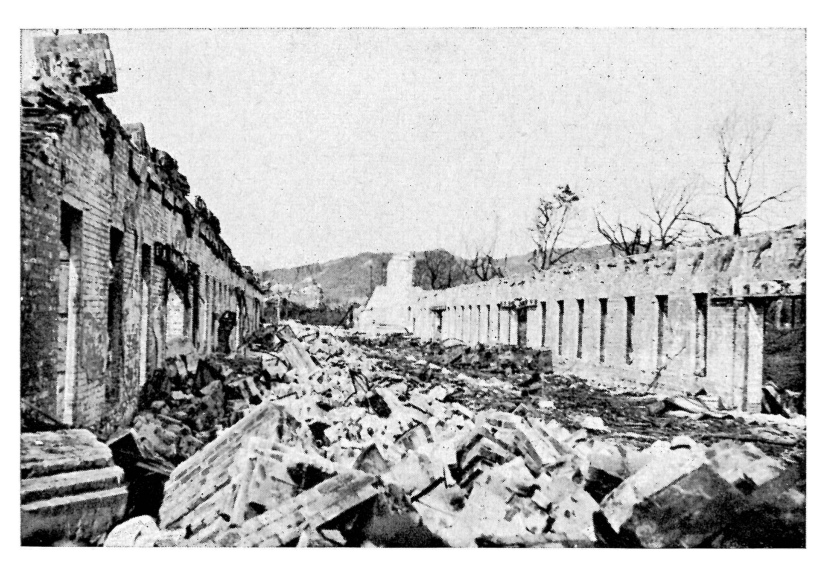


Bild 4.89a *Inneres eines zweigeschossigen Bauwerks mit tragenden Mauerwerkswänden; die Wände waren 48 cm dick (1290 m vom Nullpunkt in Hiroshima). Der Luftdruck brachte das Dach, das 2. Geschoß und einen Teil des ersten Geschosses zum Einsturz, aber ein großer Teil des Schadens entstand durch Feuer.*



Bild 4.89 b *Bauwerk mit tragenden Wänden von schwerer Konstruktion; die 70 cm dicken Backsteinaußenwände mit Strebepfeilern wurden zertrümmert (550 m vom Nullpunkt in Nagasaki).*

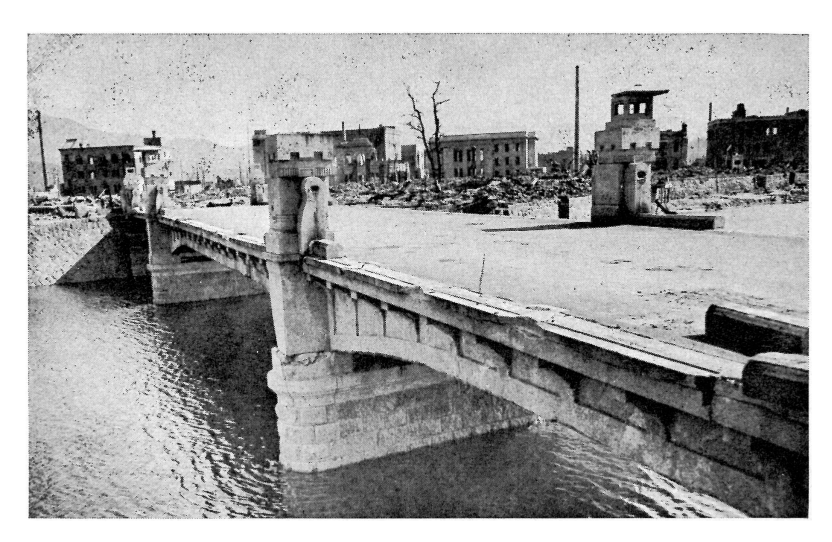


Bild 4.90a *Brücke mit Stahlbetonfahrbahndecke auf Stahlträgern; der äußere Träger hatte eine Betonverkleidung (etwa 80 m vom Nullpunkt in Hiroshima). Das Brückengeländer war weggedrückt worden, aber die Fahrbahn wurde nur wenig beschädigt, so daß der Verkehr weitergehen konnte.*

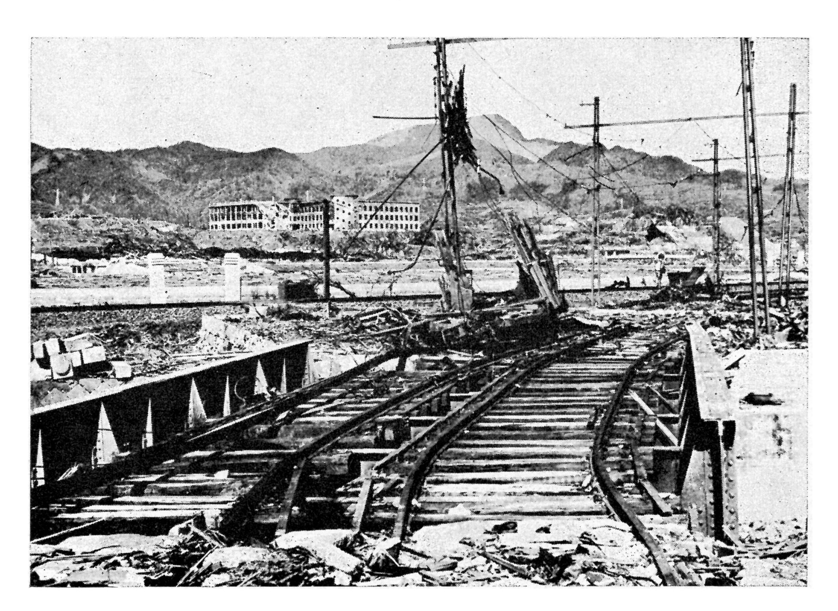


Bild 4.90b *Zweigleisige Eisenbahnbrücke mit Stahlträgern (etwa 260 m vom Nullpunkt in Nagasaki). Die Stahlträger wurden durch den Luftdruck etwa 1 m weggedrückt. Die Eisenbahnschienen verloren ihre Form, und die Wagen wurden zerstört, aber die Masten blieben stehen.*

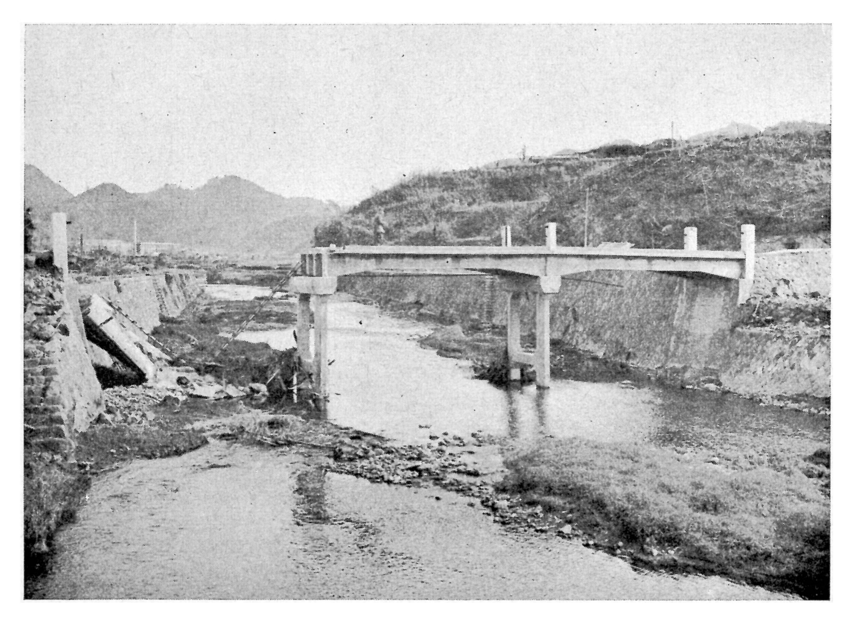


Bild 4.90c Stahlbetonbrücke mit T-Träger-Fahrbahn (etwa 700 m vom Nullpunkt in Nagasaki). Ein Teil der Fahrbahn wurde vom Brückenpfeiler und Widerlager durch den Luftdruck abgeschlagen, wodurch eine Brückenstützweite von etwa 10 m in den Fluß fiel. Der Rest der Brücke blieb fast unbeschädigt.

Verkehrsmittel

Straßenbahnen und Kraftwagen

4.91 In Japan wurden die Straßenbahnanlagen durch Druckstoß und Brand schwer beschädigt, obwohl die Masten oft stehenblieben. Omnibusse und Personenkraftwagen wurden meist durch Druckstoß- und Brandwirkung sowie durch umherfliegende Teile unbenutzbar gemacht, jedoch schienen sie in entsprechendem Abstand von der Explosion ziemlich gut davongekommen zu sein. So wurde in einer Entfernung von 915 m vom Nullpunkt ein Kraftwagen amerikanischer Bauart schwer beschädigt und in Brand gesetzt (Bild 4.91), aber ein ähnlicher Wagen in 1830 m Entfernung erlitt nur geringe Beschädigungen.

4.92 Personenkraftwagen und Omnibusse wurden in Nevada verschiedenen Kernexplosionsversuchen ausgesetzt. Dort war aber die ganze Situation – besonders hinsichtlich der Brand- und Splitterwirkung – etwas anders als in Japan. Im Nachstehenden ist die Entfernung zur Überdruckspitze in Beziehung gesetzt. Es darf jedoch nicht vergessen werden, daß an erster Stelle meist nicht der Überdruck,

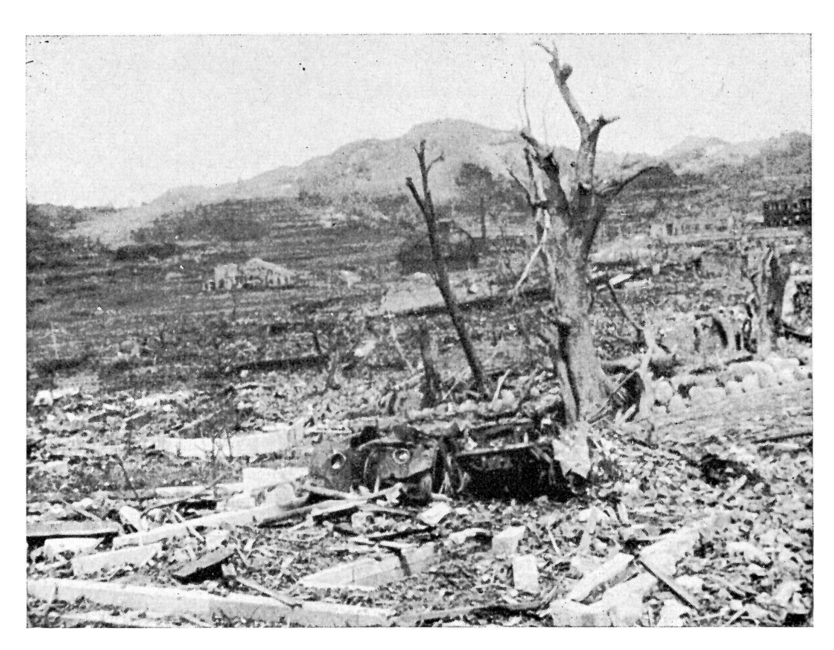


Bild 4.91 Blick über Nagasaki mit zerstörten Kraftwagen im Vordergrunde (etwa 915 m vom Nullpunkt)



Bild 4.92a Wirkung der Kernexplosion auf Personenkraftwagen in parkplatzähnlicher Anordnung, Versuchsgelände von Nevada. Ein großer Teil der Schäden an den Scheiben, der Lackierung und dem Wageninneren wurde durch Brände infolge thermischer Strahlung verursacht.

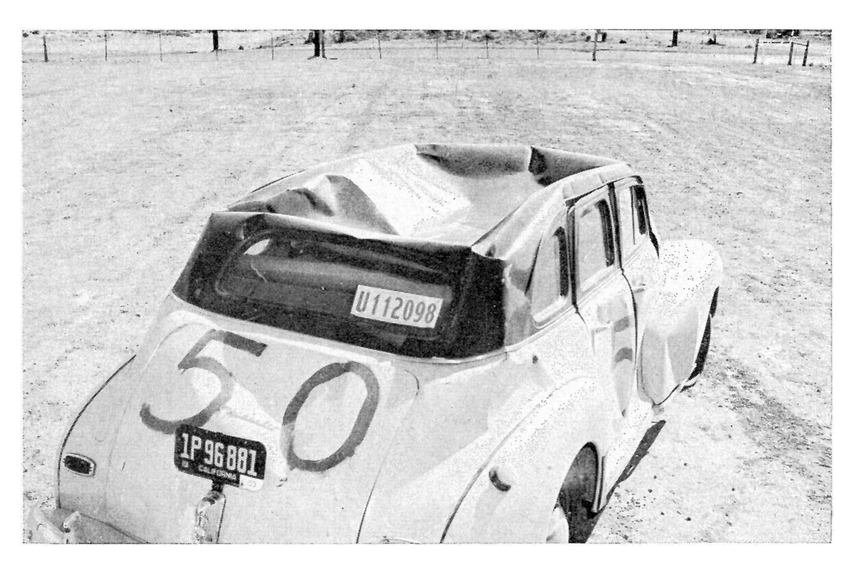


Bild 4.92b *Schaden an einem Personenkraftwagen, der hinter einem Holzfachwerkhaus abgestellt war (0,35 atü Überdruck); das Vorderteil dieses Wagens ist in Bild 4.14 zu sehen. Der Wagen konnte, obwohl er schwer beschädigt war, nach der Explosion weggefahren werden.*



Bild 4.92c *Gewöhnlicher Verkehrsomnibus, durch Kernexplosion beschädigt; dieser wurde ebenso wie der links im Hintergrund stehende umgekippt und kam, wie dargestellt, in etwa 15 m wieder zum Stehen.*



Bild 4.92 d Schaden am Inneren des vorstehend abgebildeten Omnibusses durch Luftdruck, Verschiebung und einige Brandeinwirkungen.

sondern der Winddruck den Schaden verursachte. Daher kann man die Radien der Schadensbereiche nicht nur vom Überdruck aus ermitteln, sondern muß eine Tabelle (wie in Kap. VI, Bild 6.41 c) benutzen, die die anderen Wirkungen einbezieht. Die Wirkungen einer Kernexplosion auf Kraftfahrzeuge zeigen die Bilder 4.92 a–d.

Kraftfahrzeuge wurden bei einer Überdruckspitze von 0,35 atü stark mitgenommen. Die Dächer und Seiten der Karosserie wurden eingedrückt, Fenster zertrümmert und Motorhauben aufgerissen; doch waren die Motoren noch intakt, und die Fahrzeuge konnten nach der Explosion weggefahren werden. Sogar bei höheren Druckstoßwerten und noch größerem Gesamtschaden blieben die Motoren anscheinend unversehrt.

Rettungsfahrzeuge

4.93 1955 wurden bei den Explosionen in Nevada Versuche durchgeführt, um festzustellen, wie weit die verschiedenen Rettungsfahrzeuge und ihre Ausrüstung unmittelbar nach einem Kernwaffenangriff noch brauchbar sein würden. Zu den verwendeten Fahrzeugen gehörten ein Rettungswagen, Gas- und Stromversorgungs- oder Reparaturwagen, Fahrzeuge der Fernmeldedienste, Feuerlöschwagen und Leiterfahrzeuge. Eines der Fahrzeuge war einem Überdruck von 2,1 atü ausgesetzt, zwei Fahrzeuge 0,35 atü, weitere zwei 0,12 atü und sechs Fahrzeuge etwa 0,07 atü. Zu erwähnen ist, daß bei den Kraftwagen der Überdruck nicht den einzigen Schadensfaktor bildete (s. Bild 6.41 c).

4.94 Das Rettungsfahrzeug, das seinen Standort bei 2,1 atü hatte, wurde vollkommen zerstört. Nur ein Rad und ein Teil der Achse wurden nach der Explosion noch vorgefunden. Bei 0,35 atü Überdruck wurden an einem schweren Stromversorgungsfahrzeug, das in Explosionsrichtung aufgestellt war, die Windschutzscheibe zertrümmert, die Türen und die Fahrerkabine eingebeult, die Motorhaube teilweise weggerissen und eine Geräteschranktür eingedrückt (Bild 4.94). Jedoch wurden weder die Werkzeuge noch die Ausrüstung beschädigt. Das Fahrzeug wurde weggefahren, ohne daß Reparaturen notwendig wurden. An der gleichen Stelle stand mit der Seitenfläche zur Explosionsrichtung ein Lastwagen mit einer auf der Ladefläche befestigten Erdbohrmaschine. Dieses Fahrzeug wurde umgeworfen und etwas beschädigt, blieb aber verwendungsfähig. Die Erdbohrmaschine wurde losgerissen und lag auf der Seite, wobei Benzin und Kühlwasser ausliefen.

4.95 An dem Standort mit 0,12 atü Überdruck wurden ein leichtes Stromversorgungsfahrzeug und ein Feuerwehrwagen mit einer 23 m hohen Kraftfahrdrehleiter nur geringfügig beschädigt; die Fenster wurden zertrümmert und die Karosserien verbeult. In keinem Falle wurde die Ausrüstung beschädigt. Beide Fahrzeuge hätten zu sofortigem Einsatz nach einem Angriff bereitgestanden. Zwei Fernmeldewagen, zwei Gasversorgungswagen, eine Feuerspritze, ein Feuerwehrgeländewagen, die einem Überdruck von 0,07 atü ausgesetzt waren, blieben fast unbeschädigt.

4.96 Man kommt also zu dem Schluß, daß die für Katastrophen- oder Rettungseinsatz entwickelten Fahrzeuge in besonderer Weise zu konstruieren sind, so daß sie

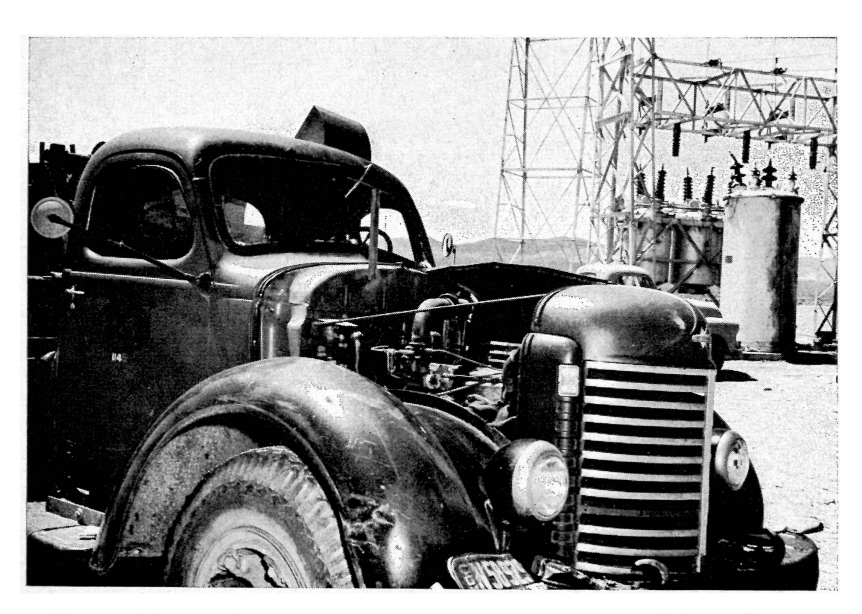


Bild 4.94 Leichter Schaden an schwerem Stromversorgungsfahrzeug (0,35 atü Überdruck)

einen Maximaldruckstoß von 0,35 atü sowie den damit verbundenen dynamischen Druck aushalten und einsatzfähig bleiben können. Werkzeuge und Geräte sind vor dem Druckstoß durch entsprechende Ausbildung der Karosserie des Fahrzeugs zu schützen oder in Behältern mit starken Türen unterzubringen.

Schienenfahrzeuge

4.97 In Japan sowie bei einem Versuch in Nevada erlitten Schienenfahrzeuge Druckstoßschäden. Ebenso wie die Kraftfahrzeuge sind diese Objekte sehr empfindlich gegen Winddruck, und der Schaden kann nicht direkt zu dem Überdruck in Beziehung gesetzt werden. Ein leerer, hölzerner Güterwagen wird bei einer Überdruckspitze von 0,14 atü verhältnismäßig wenig beschädigt. Bei 0,28 atü ist der Schaden an einem beladenen, hölzernen Güterwagen schon etwas größer (Bild 4.97a). Bei einer Überdruckspitze von 0,42 atü wurde der Aufbau eines leeren, hölzernen Güterwagens mit einem Gewicht von etwa 20 t von seinem Fahrgestell gerissen und landete in 1,80 m Entfernung. Das Fahrgestell wurde – offenbar durch das Bremsgestänge, das das Fahrgestell mit dem Aufbau verband – aus den Schienen gehoben. Am gleichen Platze blieb ein ähnlicher Güterwagen, mit 30 t Sandsäcken beladen, aufrecht stehen (Bild 4.97b). Obwohl die Seitenwände schwer beschädigt und das

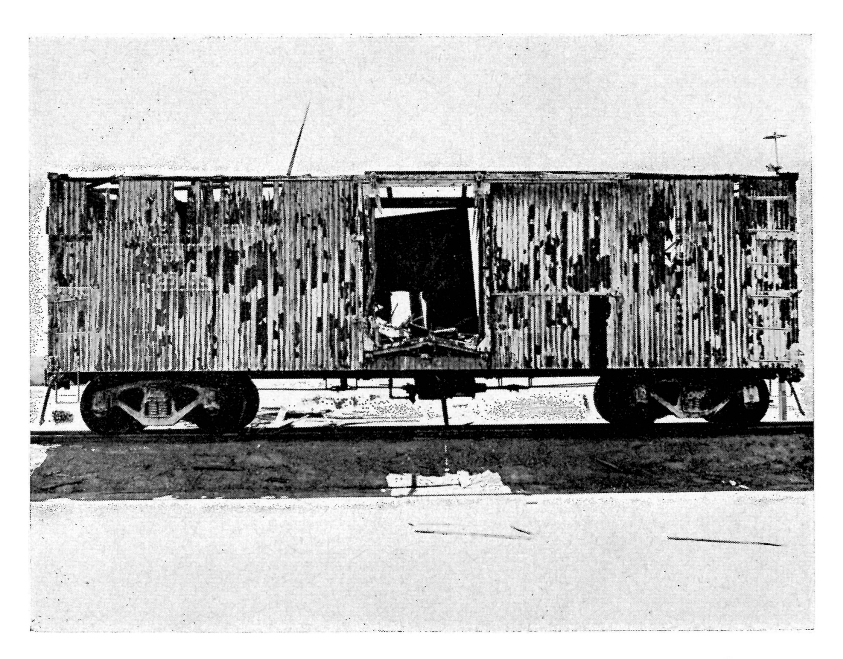


Bild 4.97a Beladener hölzerner Güterwagen nach der Kernexplosion (0,28 atü Überdruck)

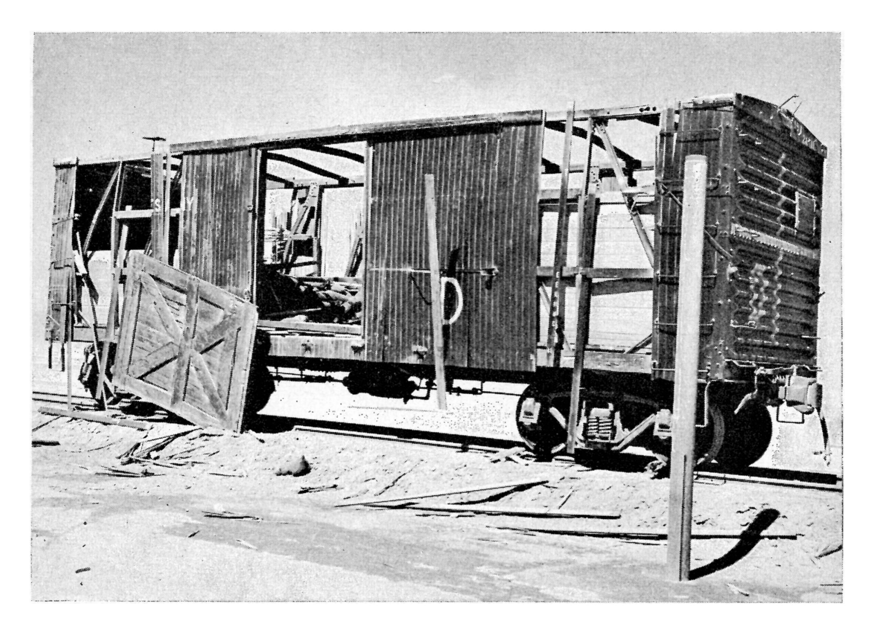


Bild 4.97b Beladener hölzerner Güterwagen nach der Kernexplosion (0,42 atü Überdruck)

Dach zertrümmert waren, konnte der Güterwagen auf eigenen Rädern fortbewegt werden. Bei 0,53 atü Überdruck wurde ein beladener Güterwagen gleichen Typs umgeworfen, und bei 0,63 atü wurde er völlig zertrümmert.

4.98 Eine Diesellokomotive mit einem Gewicht von 46 t wurde einem Druckstoß von 0,42 atü ausgesetzt, während der Motor lief. Nach dem Druckstoß lief der Motor trotz beschädigter Fenster, Türen und Verkleidungsbleche normal weiter. Die Gleisanlagen wurden nicht beschädigt.

Abgestellte Transportflugzeuge

4.99 Transportflugzeuge üblicher Art werden durch die Druckstoßwirkung bei Überdruckspitzen von 0,07 bis 0,14 atü beschädigt. Bei Überdruckspitzen von 0,28 bis 0,42 atü ist eine völlige Zerstörung oder eine Beschädigung zu erwarten, deren Reparatur nicht mehr wirtschaftlich wäre. Innerhalb dieses Druckbereichs scheint die Überdruckspitze den Hauptfaktor bei der Entstehung des Schadens zu bilden; jedoch haben die Versuche gezeigt, daß bei gleichen Überdrücken die Beschädigung eines Flugzeugs, das mit dem Bug dem Explosionspunkt zugewandt ist, geringer ist als bei einem Flugzeug, das mit dem Heck oder einer Seite dem Explosionspunkt zugewandt ist.

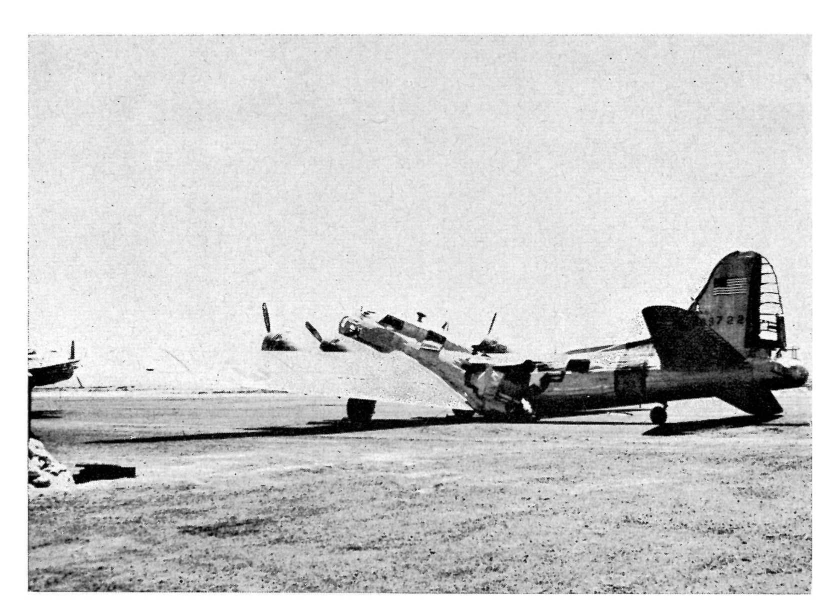


Bild 4.100a Flugzeug nach der Kernexplosion; eine Seite des Flugzeugs war der Explosion zugewandt (0,25 atü Überdruck).

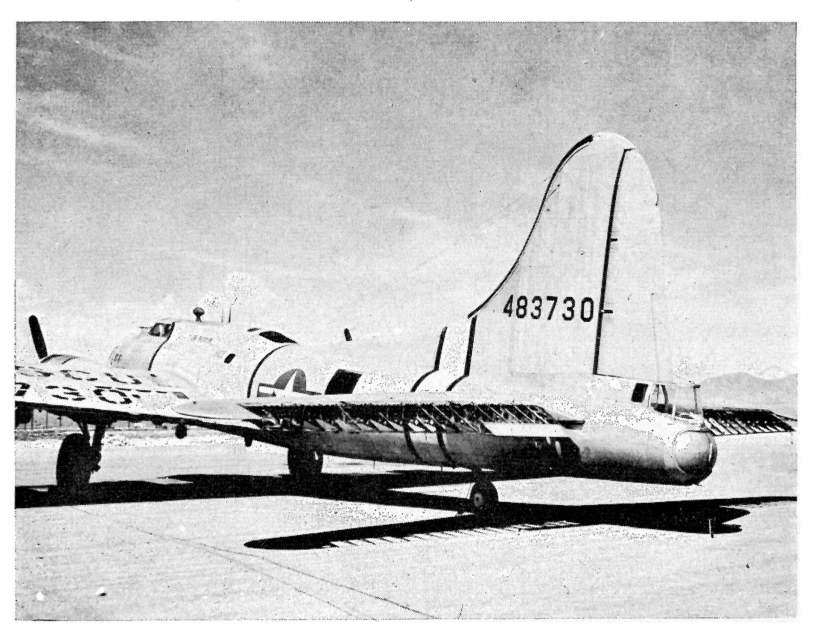


Bild 4.100b Flugzeug nach der Kernexplosion; das Heck des Flugzeugs war der Explosion zugewandt (0,17 atü Überdruck).

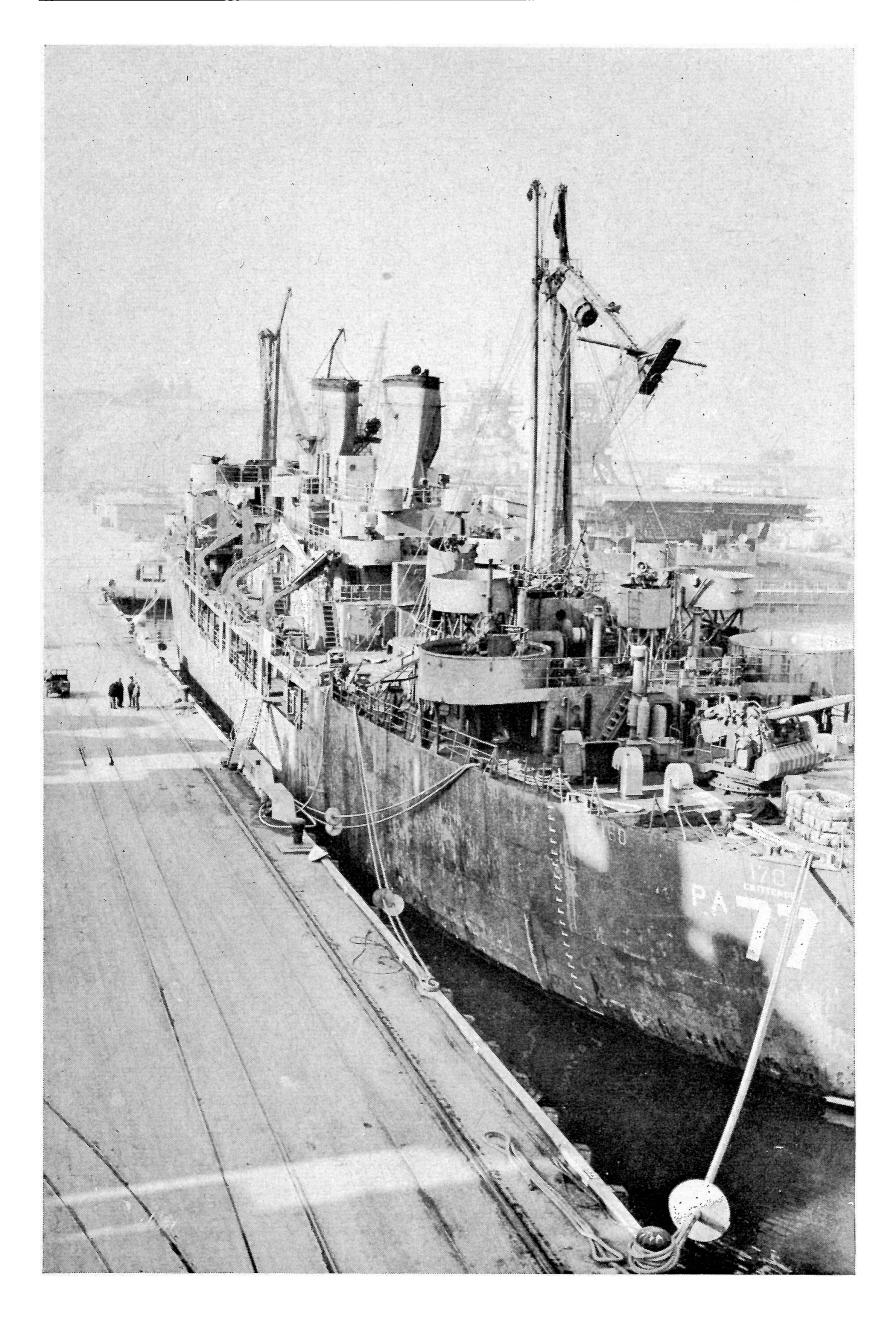


Bild 4.101 a *Der amerikanische Dampfer »Crittenden« nach dem ABLE-Versuch; es entstand nur mittlerer Schaden (750 m vom Nullpunkt).*

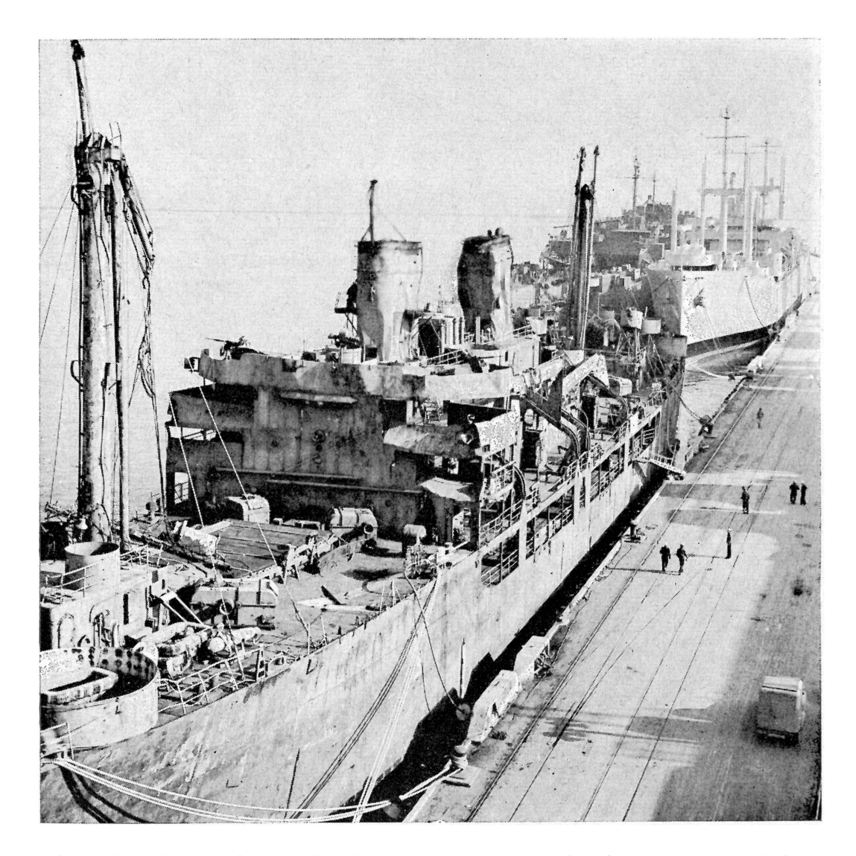


Bild 4.101b Größere sichtbare Schäden am Oberbau des amerikanischen Dampfers »Crittenden«; man sieht die gebrochenen Masten und Schornsteine sowie Schäden am Deck.

4.100 Bild 4.100a zeigt ein Flugzeug, dessen linke Seite der Druckstoßwelle mit einem Maximaldruck von 0,25 atü zugewandt war. Der Rumpf des Flugzeugs brach kurz hinter der Tragfläche zusammen. Die Beplankung des Rumpfes, das Leitwerk und die Motorhauben waren stark verbeult. Bild 4.100b zeigt die Beschädigung eines Flugzeugs, das mit dem Heck zum Explosionspunkt stand und einem Druckstoß von 0,17 atü ausgesetzt war. Die Beplankung war am Höhenleitwerk, am Seitenleitwerk, an der Tragflächenoberseite über den Landeklappen und den äußeren Tragflächenteilen eingebeult. Die Spanten am Seitenleitwerk und das Rahmenwerk des Rumpfes in der Nähe der Kanzel waren eingebeult.

Schiffe

4.101 Der ABLE-Versuch (20-kt-Luftexplosion) auf Bikini im Juli 1946 lieferte Angaben über die Wirkungen des Druckstoßes auf Schiffe und ihre Ladungen. Aus den festgestellten Wirkungen ergab sich, daß bei einem Abstand von 760 bis 920 m vom Nullpunkt auf der Wasseroberfläche, d. h. bei Überdruckspitzen von etwa 0,7 bis 0,85 atü, Schiffe aller Art schwer beschädigt oder versenkt wurden (Bild 4.101a und b). Mittlere Schäden wurden bis zu 1400 m Entfernung, d. h. bei 0,42 atü Überdruck, festgestellt. Kleinere Schäden traten innerhalb eines Umkreises von 1800 m, d. h. bei 0,28 atü Überdruck auf.

4.102 Sofern das Schiff schwimmfähig blieb, blieb auch die Maschinenanlage offenbar intakt. Die wesentlichste Ausnahme bildeten die Druckstoßschäden an Kesseln und Füchsen, was meist zur Folge hatte, daß die Schiffe bewegungsunfähig wurden. Im allgemeinen erlitten die Kessel in einem Abstand bis zu 825 m schwere und bis zu 1220 m mittlere Schäden. Leichtere Schäden traten bis zu 1500 m auf, d. h. bei Überdruckspitzen von etwa 0,77 atü bzw. 0,56 atü und 0,35 atü.

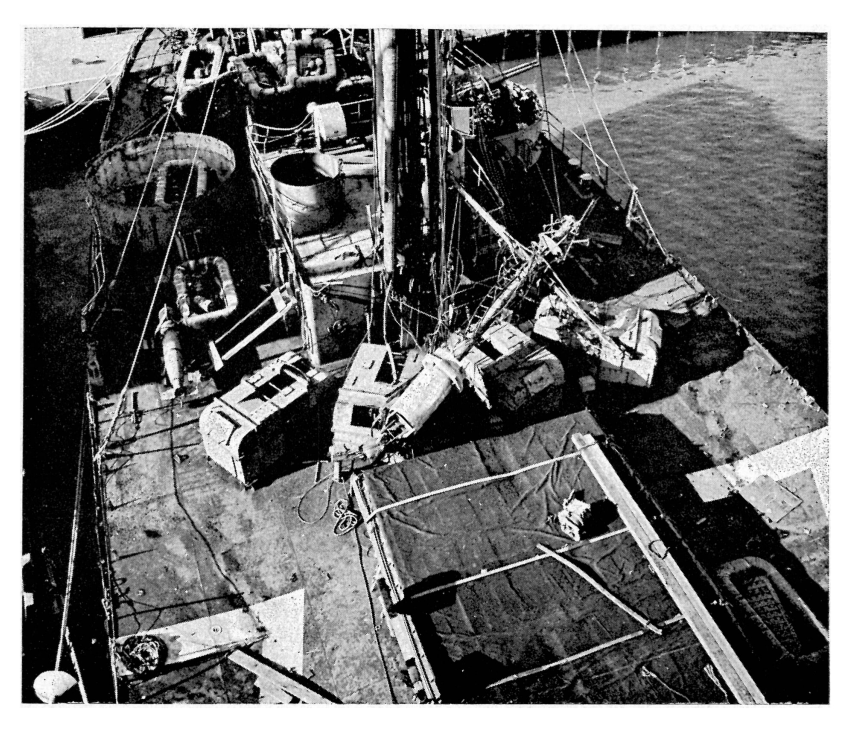


Bild 4.104a Schaden am Vorschiff des amerikanischen Dampfers »Crittenden« beim ABLE-Versuch

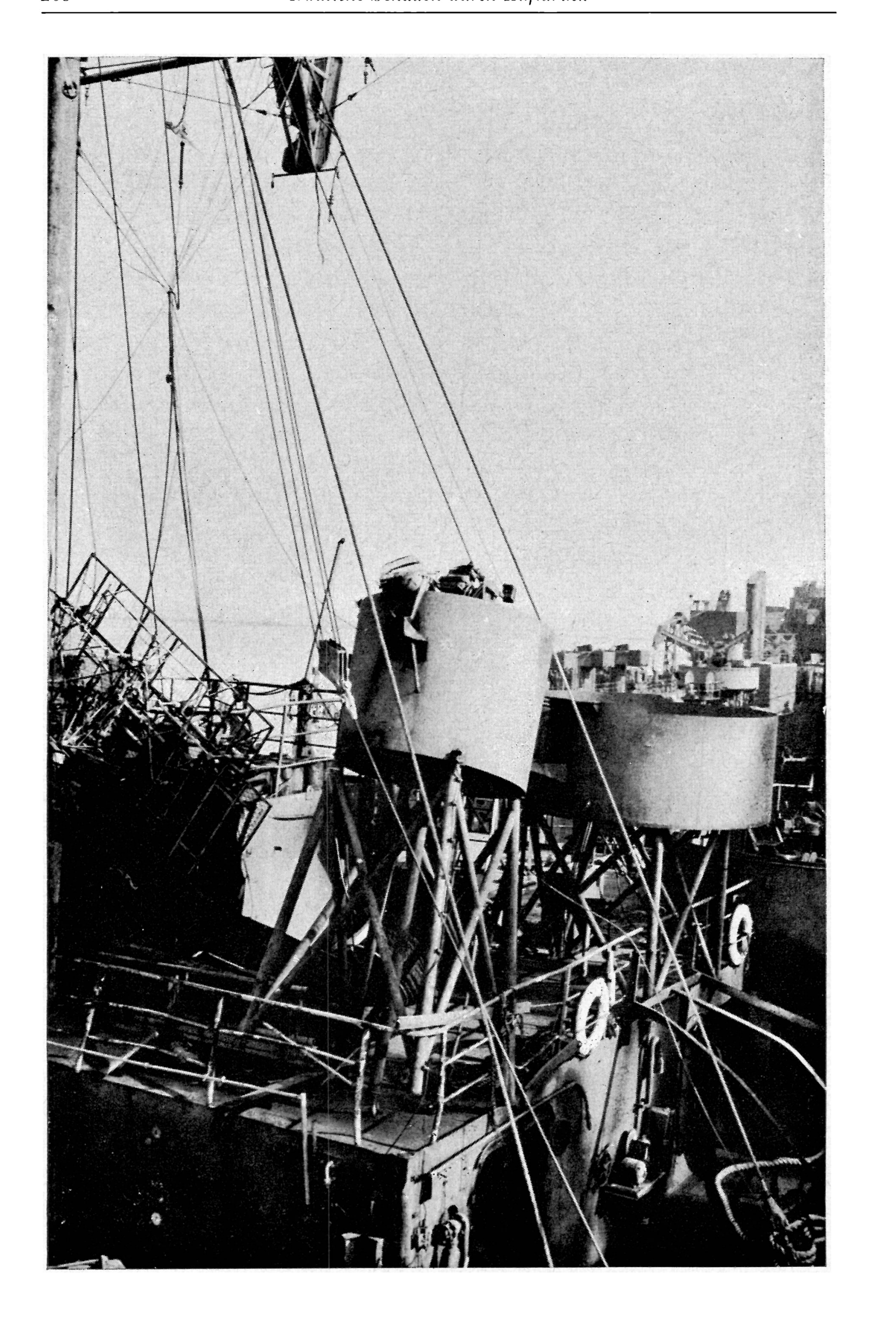


Bild 4.104b Schaden am Heck des amerikanischen Dampfers »Crittenden«

4.103 Leichte Konstruktionen und stoßempfindliche Geräte im Innern des Schiffes sind auch bei Schließen aller äußeren Öffnungen vor einer Kernexplosion nicht vor schweren Schäden gesichert. Eine Verringerung des Schadensgrades kann durch stoßgesicherte Anbringung erreicht werden.

4.104 Die Deckaufbauten der Schiffe waren nicht geschützt und wurden daher durch den Druckstoß schwer beschädigt (Bild 4.104a und b). Leichtere Wasserfahrzeuge und Flugzeuge trugen auch schwerere Schäden davon, wenn sie sich in der Nähe des Nullpunktes befanden. Die Masten, Rahen und Radarantennen sind durch Druckwirkung leicht zu beschädigen. Daher richtet sich das Ausmaß der Schäden vor allem nach dem dynamischen Druck und der Dauer der positiven Phase der Druckstoßwelle. Die Schadenswirkungen dürften – wie weiter unten erwähnt – den Schäden gleichartiger Konstruktionen auf dem Festlande entsprechen.

Versorgungsleitungen und Fernmeldeverbindungen

Stromverteilungssysteme

4.105 Durch die schweren Schäden, die den japanischen Städten bei den Kernexplosionen zugefügt wurden, hat das elektrische Leitungsnetz stark gelitten. Die Leitungsmasten wurden durch Druckstoß oder Brände zerstört. Oberleitungen wurden im Abstand von 2,8 km vom Nullpunkt schwer beschädigt. Unterirdisch verlegte elektrische Leitungen wurden allerdings kaum beschädigt. Schaltgeräte und Transformatoren wurden weniger durch den Druckstoß direkt als vielmehr durch sekundäre Wirkungen beschädigt, z. B. durch Einsturz der umgebenden Bauteile oder durch Trümmer. Die Motoren oder Generatoren wurden durch Brandwirkung beschädigt.

4.106 Eine ziemlich eingehende Untersuchung der Wirkungen von Kernexplosionen auf Stromversorgungsanlagen wurde bei den Versuchen in Nevada im Jahre 1955 vorgenommen. Diese Versuche sollten unter anderem folgendes Ziel haben:

1. festzustellen, bei welcher Druckstoßwirkung die üblichen elektrischen Anlagen geringen oder gar keinen Schaden erleiden würden;

2. Ausmaß und Art des bei einem Kernwaffenangriff auftretenden Schadens zu ermitteln;

3. festzustellen, welche Art Reparaturen erforderlich sein würden, um die Stromversorgung in den Gebieten wiederherzustellen, in denen Wohnhäuser und Fabriken nur soweit in Mitleidenschaft gezogen wurden, daß sie nach kleineren Reparaturen wieder gebrauchsfähig wären.

Nach diesen Gesichtspunkten wurden zwei gleiche Systeme elektrischer Leitungen angelegt. Das eine System sollte einem Druckstoß von etwa 0,35 atü, das andere

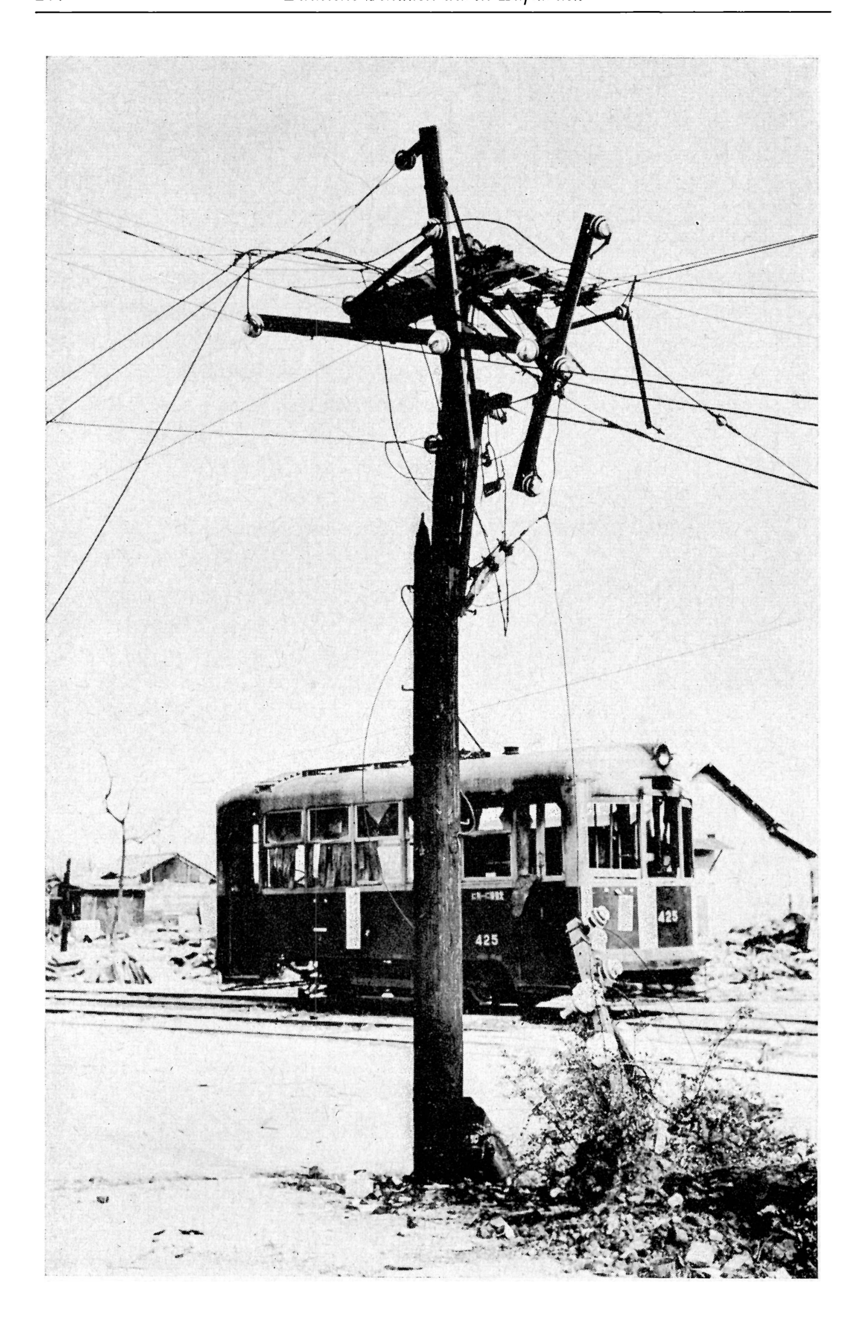


Bild 4.105 Schaden am elektrischen Leitungsmast (1,3 km vom Nullpunkt in Hiroshima)

etwa 0,12 atü ausgesetzt werden. Man erinnert sich, daß bei dem niedrigeren Überdruck ein typisch amerikanisches Wohngebiet nicht so beschädigt wird, daß es nicht mehr bewohnbar gemacht werden könnte.

4.107 Jedes Leitungsnetz bestand aus einer Hochspannungsleitung (69 kV) an stählernen Gittermasten, die zu einer üblichen Freiluftschaltstation führte. Von dort gingen übliche oberirdische Verteilungsleitungen an 15 Holzmasten ab, die je 13,8 m lang und 1,80 m in den Boden eingelassen waren. Hausanschlußleitungen führten den Strom dann zu Geräten, die sich in einigen der bei den oben beschriebenen Versuchen verwendeten Häuser befanden. Diese Installationen entsprachen den in Stadtgebieten üblicherweise verwendeten. Weiterhin stellten die 69-kV-Hochspannungsleitung, die 69-kV-Schaltstelle mit Ölschalter und Transformator Anlagen dar, wie sie bei großen Industriebetrieben zur Stromzufuhr benutzt werden könnten.

4.108 Durch Überdruck von 0,35 atü wurde das elektrische Leitungssystem etwas, aber nicht ernstlich beschädigt. Im ganzen schienen die Schäden etwa den Auswirkungen schwerer Stürme ähnlich zu sein. Zu den direkten Druckwirkungen kamen noch Schäden hinzu, die durch herumfliegende Trümmer verursacht wurden.

4.109 Der einzige Schaden, den die Hochspannungsleitung erlitt, war der Bruch des Gittermastes, der die Freileitung mit herunterriß (Bild 4.109a). Es ist festzustellen, daß der Gittermast, an dem die Leitung endete und dessen Konstruktion viel stärker und schwerer war, sowie ein anderer Gittermast, der etwas stärker gebaut

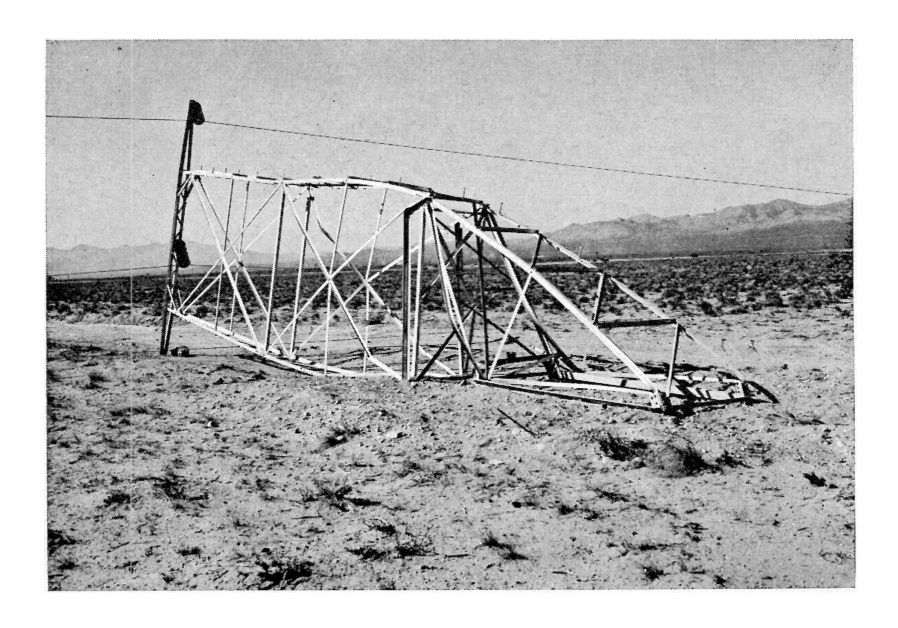


Bild 4.109a Umgestürzter Gittermast (0,35 atü Überdruck bei einer 30-kt-Explosion, Versuchsgelände von Nevada)

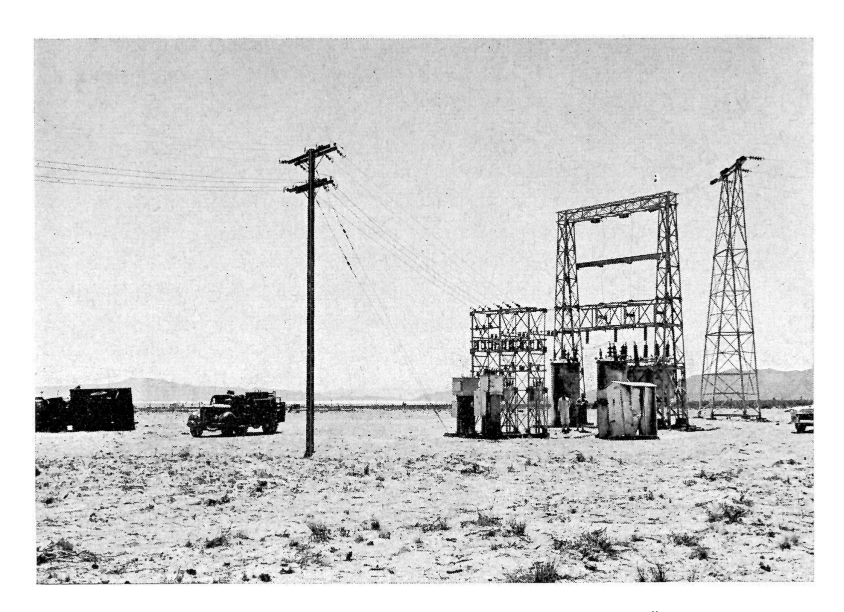


Bild 4.109b Abspannmast, Tragmast und Transformatoren (0,35 atü Überdruck bei einer 30-kt-Explosion, Versuchsgelände von Nevada)

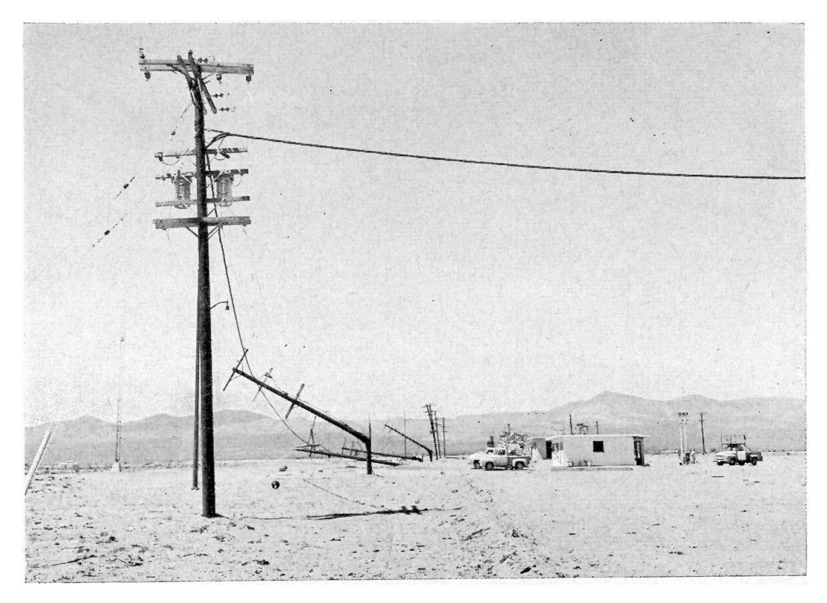


Bild 4.111 Zusammenbruch der elektrischen Leitungsmasten (0,35 atü Überdruck bei einer 30-kt-Explosion, Versuchsgelände von Nevada)

war, nur geringfügig beschädigt waren (Bild 4.109b). In einigen Gebieten der Vereinigten Staaten sind die Gittermasten von ähnlich starker Konstruktion. Aber da Bauwerke dieser Art gegen Winddruck empfindlich sind, stellt der Überdruck nicht das einzige Schadenskriterium dar.

4.110 Die Transformatoren-Nebenstation hielt die Druckwirkung mit verhältnismäßig geringem Schaden an den Hauptteilen aus. Der Metallkasten, in dem Meßgeräte, Batterien und Relais eingebaut waren, wurde ziemlich stark beschädigt. Aber diese Nebenstation und ihre Einrichtungen sind für einen Notbetrieb der Kraftstromversorgung nicht unbedingt erforderlich. Die 4-kV-Regler waren auf dem Betonsockel verschoben worden; demzufolge waren die elektrischen Verbindungen zu einem Oberleitungsbus unterbrochen. Die Glaszellen der Batterien waren zerbrochen, die meisten Platten unbrauchbar. Aber die Relais, Meßgeräte und andere Instrumente waren bis auf Glasschäden unbeschädigt. Die Nebenstation war insgesamt in genügend betriebsfähigem Zustand, der es gestattet hätte, auf nichtautomatische Weise (Handbetrieb) zu arbeiten. Nach Ersatz der Batterien wäre auch der automatische Betrieb wiederherzustellen gewesen.

4.111 Von den insgesamt 15 Holzmasten, die die Leitung von der Nebenstation zu den Häusern führten, wurden vier Masten vollständig umgeworfen und zerbrochen, zwei weitere schwer beschädigt. Der Zusammenbruch der Holzmasten wurde teilweise dem Gewicht und dem Widerstand des Freileitungskabels zugeschrieben (Bild 4.111). Weitere Schäden wurden auf umherfliegende Trümmer zurückgeführt.

4.112 Verschiedene Verteilungstransformatoren waren von den Leitungsmasten herabgerissen worden, ebenso lagen Nebenleitungsdrähte und Abzweigleitungen am Boden. Doch waren die Transformatoren mit den gesamten Einzelteilen aus Aluminium oder Kupfer sowie die Freileitungsdrähte unbeschädigt geblieben. Wenn auch an den Zuleitungsdrähten und Holzmasten einige Ausbesserungsarbeiten notwendig gewesen wären, so war doch der gesamte Schadensumfang nur so, daß er in etwa einem Tage mit Ersatzteilen behoben werden könnte, die von Stromversorgungsbetrieben üblicherweise auf Lager gehalten werden.

Gas-, Wasser- und Abwasserleitungen

4.113 Die öffentlichen Versorgungsanlagen in Nagasaki entsprachen denen in einer etwas kleineren Stadt der Vereinigten Staaten, abgesehen davon, daß offene Gräben als Kanalisation dienten. Das Wasserversorgungssystem erlitt den weittragendsten Schaden, so daß Löscharbeiten fast unmöglich wurden. Von einem Sonderfall abgesehen, der weiter unten beschrieben ist, rührte der Druckverlust der Wasserleitungen mehr aus Rohrbrüchen im Innern und an den Hausanschlüssen oder an anderen Bauteilen her als aus Brüchen unterirdischer Leitungen (Bild 4.113a und b). Den erwähnten Sonderfall bildeten 30 cm weite, gußeiserne Wasserleitungsrohre, die 90 cm unter Erdgleiche in einem aufgeschütteten Gebiet lagen. Im aufgeschütteten Boden wurde eine Anzahl von Bodensenkungen – bis 30 cm Tiefe –

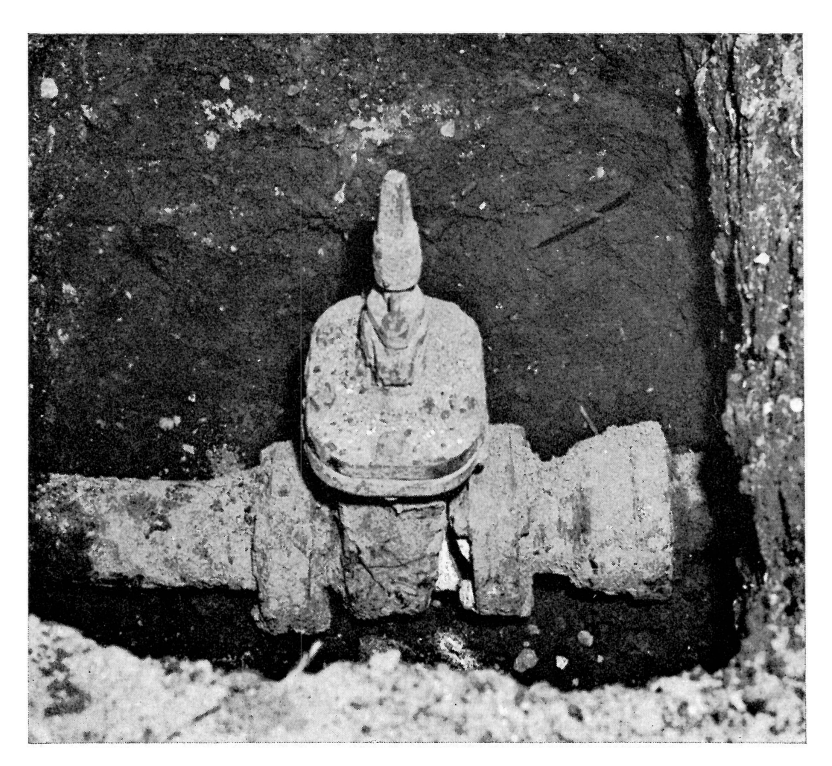


Bild 4.113a 10 cm weites Absperrventil in der Wasserleitung, durch Trümmerstücke der Backsteinmauer gebrochen (370 m vom Nullpunkt in Hiroshima)

verursacht. Hierdurch wurde der Bruch der unterirdischen Leitungsrohre verursacht, anscheinend durch ungleichmäßige Bodenverschiebungen.

4.114 In Japan entstand kein bemerkenswerter Schaden an Wasserspeichern oder Aufbereitungsanlagen. Diese lagen auch, wie üblich, außerhalb der Städte und daher in zu großer Entfernung vom Explosionspunkt, um irgendwie beschädigt zu werden.

4.115 Gasbehälter wurden bis zu einer Entfernung von 1800 m vom Nullpunkt stark beschädigt. Das ausströmende Gas geriet in Brand, aber es explodierte nicht (Bild 4.115). Die unterirdischen Gasleitungen schienen durch die Druckwirkung nur wenig betroffen zu sein.

Installationen für Naturgas oder industriell gewonnenes Gas

4.116 Eines der wichtigsten Ziele bei den Versuchen von 1955 in Nevada war zu ermitteln, wieweit Versorgungsanlagen für Naturgas oder industriell gewonnenes Gas durch eine Kernexplosion unterbrochen werden. Der Versuch sollte vor allem

Unterlagen über die Druckschäden bei unterirdischen Anlagen eines üblichen Gasversorgungssystems in gefährdetem Gebiet ergeben.

4.117 Die erprobten Anlagen bestanden aus zwei Arten, jeweils in zweifacher Anzahl. Die erste Art war eine übliche Gasversorgungs- und -verteilungsleitung aus einer 15 cm weiten Stahl- und Gußeisenrohrleitung in 92 cm Tiefe samt dazugehörigen Anschlußleitungen und Zubehörteilen. Absperrschieberschächte aus Ziegel- oder Betonsteinen enthielten die 15-cm-Absperrschieber mit den Leitungsrohren und Schutzhüllen. Ein Druckregulator in einem waagerechten Schacht in der Straße enthielt einen Niederdruckregulator, der mittels Stahlrohren angeschlossen war, die durch die Schachtwände gingen. Eines dieser unterirdischen Systeme war dort angelegt, wo etwa 2,1 atü Luftstoßüberdruck auftrat, und das andere bei 0,35 atü. Es muß dabei erwähnt werden, daß keine Wohn- oder Industriebauten üblicher Art über Erdgleiche einen höheren Überdruck als diesen aushalten könnten.

4.118 Die zweite Art der Gasversorgungsleitung bestand aus den üblichen Hausanschlußleitungen aus Stahl, Kupfer und Kunststoffen, die an Rohrstücke von 7,10 m Länge einer 15 cm weiten Hauptleitung aus Stahl angeschlossen waren. Jede Hausanschlußleitung kam an der einen Hausseite aus dem Erdreich und führte dann zu einem Druckregulator und Gasmesser. Das Leitungsrohr führte dann in Höhe von etwa 60 cm oberhalb des Erdgeschoßfußbodens durch die Hauswand. Die Kupfer- und Kunststoffleitungen hörten innerhalb der Wand auf, so daß sie bei Bewegungen des Hauses auf seinem Fundament beansprucht werden würden. Das Stahlrohr endete ebenfalls innerhalb der Wand, es war aber auch mit einem Rohrstrang ver-

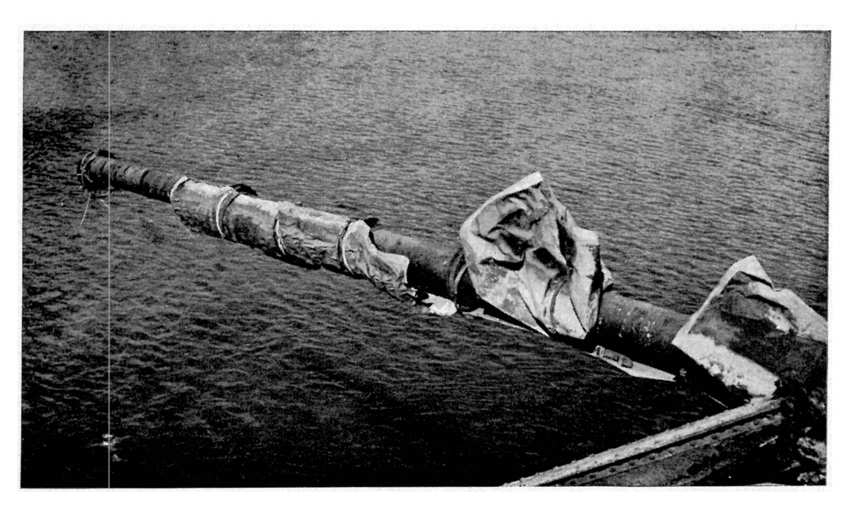


Bild 4.113b Gebrochener Teil des 40 cm weiten Wasserleitungsrohres auf einer Brücke (370 m vom Nullpunkt in Hiroshima)

bunden, der an der Rückseite des Hauses entlanglief, um die Hausleitungen auf Erdgleiche zu verbinden. Die letztere Verbindung wurde durch ein biegsames, nahtloses Bronzerohr hergestellt, das durch einen Schlitz in der Hauswand geführt war. In mehreren Häusern wurden übliche Gasgeräte aufgestellt, teilweise an die inneren Rohrleitungen angeschlossen. Eine zweite, ebensolche Installation wurde an Stellen mit Überdrücken von 0,35 bzw. 0,12 atü angelegt.

4.119 Keine der unterirdischen Versorgungsleitungen wurde durch den Druckstoß wesentlich beschädigt. Am 2,1-atü-Punkt wurde eine Druckmesserleitung bis auf den Erdboden gebogen, und der Schieberhandgriff, die Schieberstange und Haube waren weggerissen. An derselben Stelle wurden zwei Entlüftungsrohre der Straße kurz über Erdgleiche abgeschert. Einige kleinere Leckstellen zeigten sich an der mit Jute und Blei abgedichteten gußeisernen Glocke und den Schieberanschlüssen, durch eine Bodenbewegung veranlaßt, die durch Übertragung des Luftdruckstoßes in den Erdboden entstanden sein dürfte. Sonst waren die Druckstoßwirkungen nicht erwähnenswert.

4.120 Bei einem Überdruck von 0,12 atü, bei dem die Gebäude noch keinen schwereren Schaden erlitten, waren die Hausanschlußleitungen innerhalb wie außerhalb des Hauses – ebenso wie die Druckregulatoren und Gasmesser – unbeschädigt.

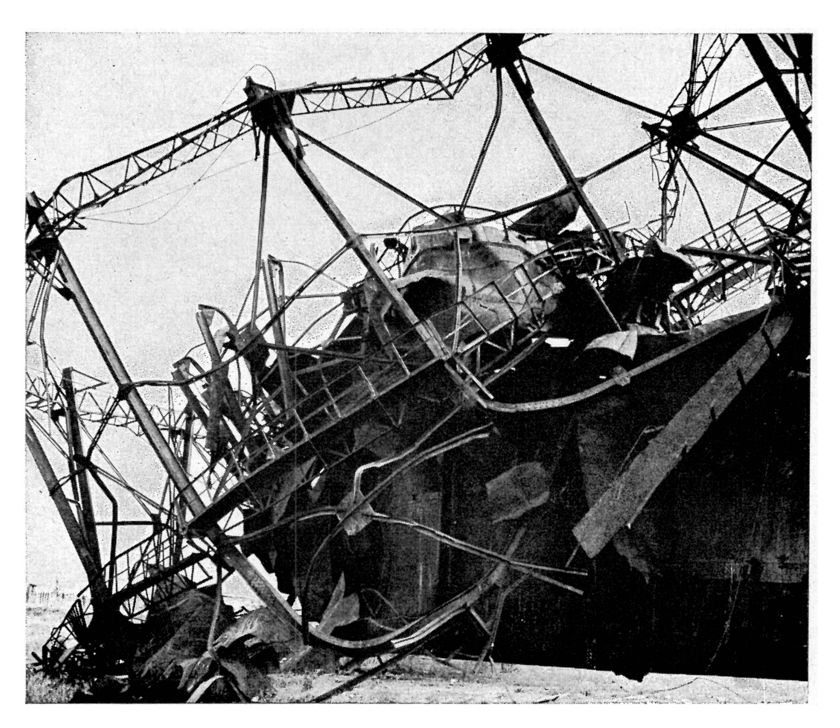


Bild 4.115 Gasbehälter, durch Kernexplosion zerstört (1015 m vom Nullpunkt in Nagasaki)

Bei dem zweigeschossigen Ziegelbauwerk, das nicht mehr repariert werden konnte, wurde bei 0,35 atü die Rohrleitung im Keller verschoben und verbogen, da die Kellerdecke zusammenbrach. Der Gasmesser wurde aus seinen Befestigungen herausgerissen und stürzte zu Boden. Doch waren der Gasmesser selbst und der Regulator nicht beschädigt und noch brauchbar. Die gesamte übrige Hausanschlußleitung mit ihren weiteren Einzelstücken war im wesentlichen intakt geblieben.

4.121 Die Haushaltgasgeräte, wie Kühlschränke, Kochherde, Raumheizkörper, Wäschetrockner, Wassererhitzer, wurden nur geringfügig beschädigt. Es kam eine gewisse Verschiebung der Geräte und ihrer Anschlüsse vor, die der sonstigen Beschädigung des Hauses entsprach. Ein umgekippter Kühlschrank und Kochherd in einem zusammengestürzten zweistöckigen Ziegelgebäude waren wahrscheinlich noch brauchbar, obwohl sie unter Trümmerschutt lagen. Man kommt daher zu dem Ergebnis, daß die Haushaltgas-(und ebenso die Elt-)geräte in all den Häusern noch verwendungsfähig sein würden, die keine größeren Schäden in ihrer Konstruktion davongetragen hatten.

4.122 Es scheint also, daß man wenig tun kann (oder müßte), um die Gasinstallation widerstandsfähiger gegen Druckstoß zu machen. Eine Verklammerung und der Ersatz bleigedichteter Verbindungen würde zu empfehlen sein, um die Leckstellen zu verringern, die durch Bodenbewegung verursacht werden könnten. Die Verteilungsleitungen, Schieber, Regulatoren und Meßgeräte sollten so weit wie möglich unter Erdgleiche angelegt werden, um direkte Druckstoß- und Splitterschäden zu verringern.

Anlagen für Flüssiggas

4.123 Bei den Versuchen von 1955 wurden verschiedene Installationen für Flüssiggas dem Druckstoß ausgesetzt, um die Wirkungen einer Kernexplosion auf die üblichen Flüssiggasbehälter und die Versorgungsleitungen zu erproben, die man z. B. in Vorstadthäusern und Bauernhöfen sowie in Lagern, Industriewerken und Versorgungsbetrieben findet. Dazu wollte man sehen, wie sich das Flüssiggas als Brennstoff für den Notfall nach einem Angriff eignen würde.

4.124 Es wurden zwei Arten üblicher Haus-(oder kleiner Geschäfts-)Anlagen von Flüssiggas dem Versuch unterworfen:

1. Ein System, das aus zwei austauschbaren, zugelassenen Zylindern mit je 45 kg Fassungsvermögen bestand,

2. Eine 1900-l-Großbehälteranlage, die von einem Tankwagen aus gefüllt werden konnte.

Einige dieser Anlagen standen im Freien, andere waren, wie üblich, durch Kupferrohre oder Stahlrohr-Hausanschlußleitungen mit den Häusern verbunden, die Überdrücken von 0,35 atü und 0,12 atü ausgesetzt waren. Andere wieder waren an Stellen mit Überdrücken von 1,76 atü und 0,7 atü errichtet. Bei dieser Anordnung ging die Rohrleitung von den Gasbehältern durch eine Betonwand, die die Wand eines Hauses darstellen sollte.

4.125 Zusätzlich zu den vorstehend erwähnten Anlagen wurde eine komplette Speicheranlage an einer Stelle errichtet, wo der Überdruck 0,35 atü betrug. Diese Anlage bestand aus einem 68000-l-Tank, in dem sich 58000 l Propan befanden, einer Kompressorpumpe, einem Abfüllgebäude, Behälterlager und allen notwendigen Ventilen, Anschlußstücken, Schläuchen, Zubehör und Verbindungsrohrleitungen.

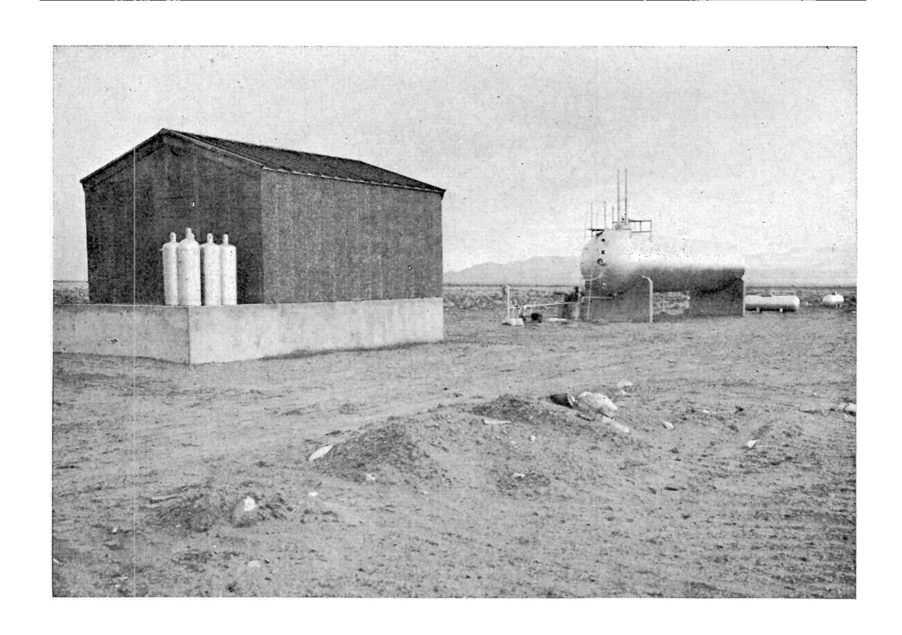
4.126 Die Doppelzylinderanlage, die einem Überdruck von 1,76 atü ausgesetzt wurde, erlitt den meisten Schaden; die Regelventile wurden aus ihren Fassungen herausgerissen, und die Zylinder wurden weggeschoben. Ein Zylinder wurde etwa 610 m weit von der eigentlichen Position fortgerollt. Er war ziemlich stark eingebeult, aber noch verwendungsfähig.

Bei 1,76 und 0,7 atü konnten die einzelnen Bestandteile, die oft auseinandergerissen waren, im allgemeinen wieder geborgen und benutzt werden. Die Zylinderanlagen wurden bei 0,35 atü meistens durch fliegende Splitter sowie durch die zusammenfallenden Trümmer der Häuser, mit denen sie in Verbindung standen, beschädigt. Die Einzelteile – abgesehen von den Kupferrohren – erlitten kaum einen Schaden und konnten weiter verwendet werden. Bei 0,12 atü wurden die Flüssiggaszylinder weder beschädigt noch verschoben. Nur einer der dem Versuch unterworfenen Zylinder hatte eine Leckstelle. Das war aber nur ein kleines Loch, das vom Auftreffen eines scharfen Gegenstandes herrührte.

4.127 Der Gastank von 1900 l zeigte sich ebenfalls sehr haltbar und wurde kaum beschädigt. Der Tank, der dem Explosionspunkt am nächsten stand, wurde über eine Entfernung von etwa 215 m weggewirbelt. Trotzdem hatte er nur oberflächlichen Schaden erlitten, seine Festigkeit und Brauchbarkeit waren nicht verringert. Das Einfüllventil war beschädigt, aber das innere Absperrventil verhinderte das Auslaufen des Inhalts. Der Tank an der Stelle von 0,7 atü wurde etwa 1,50 m verschoben, aber wenig oder gar nicht beschädigt. Alle anderen Tanks, bei 0,35 atü oder 0,12 atü, samt den an die Häuser angeschlossenen, wurden nicht verschoben oder beschädigt (Bild 4.38).

4.128 Die Anlagen der 68000-l-Tanklager- und -Abfüllstation wurden bei einem Druckstoß von 0,35 atü nur oberflächlich beschädigt. Das Abfüllgebäude wurde völlig zerstört. Die Waage zum Abwiegen der Gasbehälter wurde zerschlagen, eine Abfüllrohrleitung brach an der Stelle, wo sie in das Gebäude geführt war (Bild 4.128). Die wichtigen Betriebsleitungen der Anlage wären nicht beschädigt worden, weil die Abfüllanlagen im Freien lagen und unbeschädigt blieben. Alle Ventile und fast alle Rohrleitungen der Anlage waren intakt. Es gab keinerlei Gasverlust. Wenn man die Kraftversorgung (Elektrizität oder Benzinmotor) wiederherstellen könnte, wäre die Anlage schnell wieder betriebsfähig. Falls dies nicht möglich war, hätte man das flüssige Propan im Speichertank verwenden können, indem man die Schwerkraft in Verbindung mit dem inneren Gasdruck im Tank ausgenutzt hätte.

4.129 Durch diese Versuche kommt man zu dem Ergebnis, daß das übliche Flüssiggasgerät sehr widerstandsfähig ist – mit Ausnahme der kupfernen Leitungsanschlüsse. Eine Unterbrechung dieser Versorgungsanlage als Auswirkung eines Kernwaffenangriffs würde wahrscheinlich örtlich begrenzt und vielleicht überhaupt



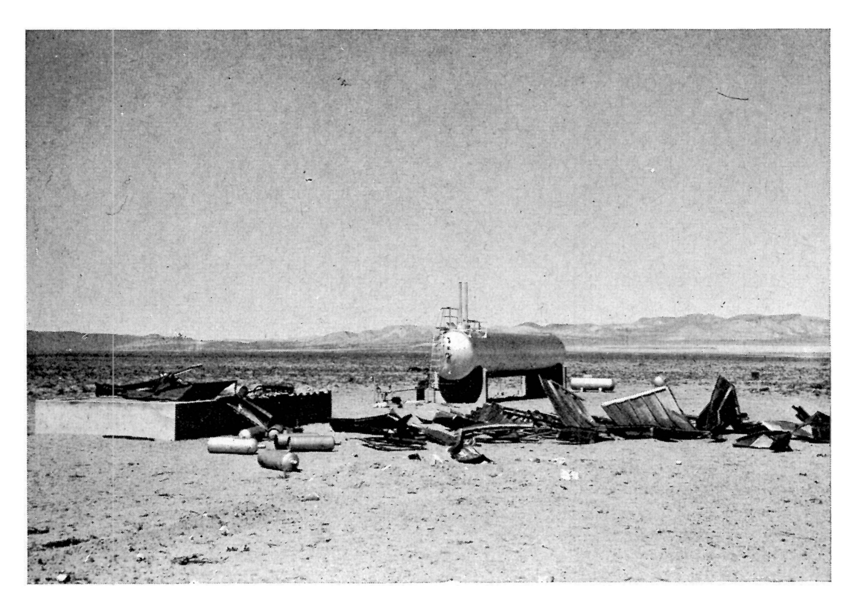


Bild 4.128 Oberes Bild: Flüssiggastanklager und Abfüllstation vor der Kernexplosion
Unteres Bild: Die Anlage nach der Explosion (0,35 atü Überdruck)

unwesentlich sein. Das Flüssiggas könnte also ein sehr wichtiger Brennstoff bei Notfällen werden. Wo man Flüssiggas für Zwecke des Haushalts verwendet, wird die Gasversorgung anscheinend so lange nicht beschädigt, wie das Haus bewohnbar bleibt.

Fernmeldeverbindungsgeräte

4.130 Die Notwendigkeit, nach einem Kernwaffenangriff über verwendungsfähige Fernmeldegeräte zu verfügen, ist offensichtlich. Deshalb wurde 1955 in Nevada eine Reihe solcher Geräte erprobt. Unter den der Wirkung ausgesetzten Geräten befanden sich bewegliche Funkgeräte, ein übliches Rundfunksendegerät, Antennenmasten, Rundfunk- und Fernsehgeräte, wie man sie in den Wohnungen

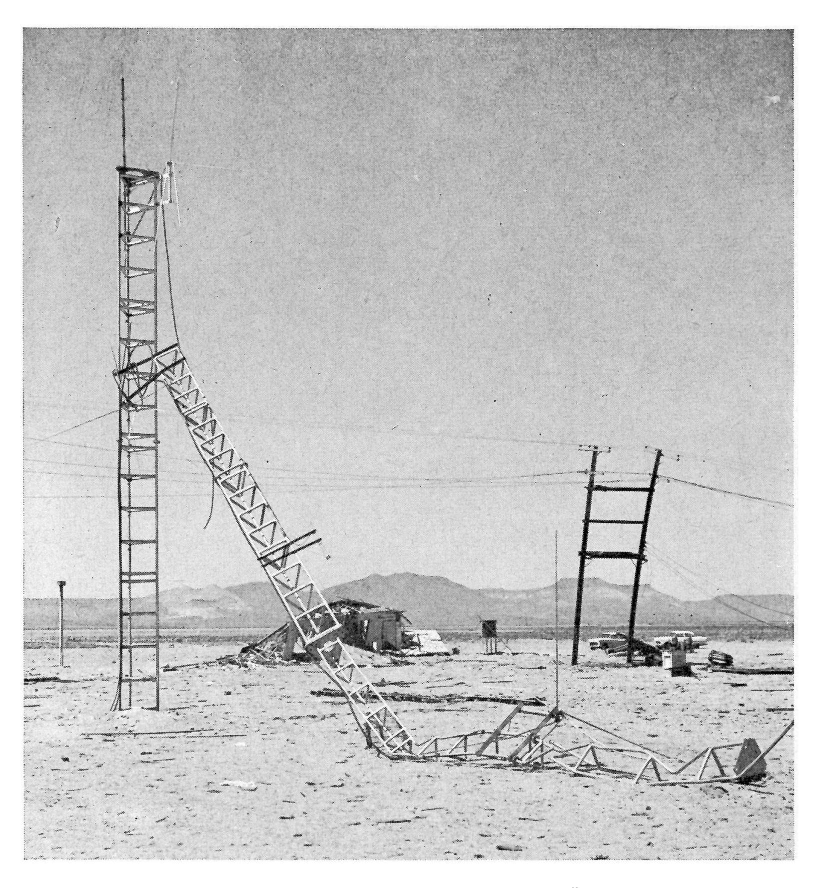


Bild 4.132 Nichtverspannter leichter Antennenmast (0,35 atü Überdruck bei einer 30-kt-Kernexplosion, Versuchsgelände von Nevada)

hat, ferner Fernsprechgeräte (einschließlich eines kleinen Vermittlungsgerätes), Lautsprecheranlagen zur Unterrichtung der Öffentlichkeit sowie Warnsirenen. Davon waren einige Geräte an Stellen mit einem Überdruck von 0,35 atü aufgestellt, und entsprechend gleiche Geräte in den meisten Fällen bei 0,12 atü. Die Schäden an der letztgenannten Stelle waren so gering, daß sie hier nicht erwähnt zu werden brauchen. Die Radien der Schadenszonen können bei dieser Art von Geräten nicht zu den Überdrücken in Beziehung gesetzt werden, sondern sollten den Tabellen in Kap. VI entnommen werden.

4.131 Die Fernmeldeverbindungsgeräte zeigten sich in den Gebieten höheren Überdrucks, wo die üblichen Häuser so beschädigt wurden, daß Ausbesserungsarbeiten zwecklos waren, sehr widerstandsfähig gegen Druckstoß. Übliche Rundfunk- und Fernsehgeräte und bewegliche Funkstellen waren verwendungsfähig geblieben, obwohl sie mit Trümmerschutt bedeckt, in einigen Fällen durch Splitter beschädigt sowie beiseite- oder etwa einen Meter nach unten geworfen waren. Keine Rundfunk- oder Bildröhre war entzweigegangen. Die einzige stark beschädigte Funkstelle befand sich in einem Kraftwagen, der durch einen einstürzenden Schornstein völlig zerdrückt worden war.

4.132 Ein verspannter Antennenmast von 46 m Höhe war nicht beschädigt, doch ein nichtverspannter Mast von 36 m Höhe und von leichterer Ausführung, der in der Nähe stand, brach in 12 m Höhe ab und stürzte auf den Erdboden (Bild 4.132). Dies war der einzige größere Schaden an den erprobten Geräten.

4.133 Die Antennen der ortsfesten Funkstellen, die in diesen Masten lagen, schienen den Druckstoß ziemlich gut überstanden zu haben, obwohl die Antennen, die sich im nichtverspannten Mast befanden, beschädigt wurden, als der Mast, wie oben berichtet, zusammenknickte. Die Fernsehantennen für Hausempfänger wurden – wie man bei ihrer leichten Konstruktion erwarten konnte – etwas mehr beschädigt. Einige wurden einmal durch die Druckstoßwirkung und zum anderen durch den Einsturz des Hauses, auf dem sie angebracht waren, verbogen. Da die Häuser bei einem Überdruck von 0,35 atü so beschädigt wurden, daß Reparaturen unwirtschaftlich gewesen wären, hat der Ausfall der Fernsehantennen weiter keine Bedeutung.

4.134 Es soll noch erwähnt werden, daß solche Anlagen wie Kraftstromleitungen und Telefonleitungen häufig an den Holzmasten der Stromversorgung angebracht waren. Wenn diese Masten dann abbrachen, wie es manchmal vorkam (s. Abschnitt 4.111), wurde das Nachrichtenverbindungsnetz entsprechend in Mitleidenschaft gezogen. Obwohl die Geräte zufriedenstellend arbeiteten, nachdem der Leitungsdraht wiederhergestellt war, scheint doch die Kraftstromversorgung die empfindliche Stelle im System der Nachrichtenverbindungen zu bilden.

Zusammenfassung

4.135 Obwohl in Kap. VI ausführlichere Angaben über die Beziehung zwischen Schaden und Entfernung bei Explosionen verschiedener Explosionswerte und bei Bauwerken verschiedener Art gemacht werden, sind für schnelle Ermittlung vereinfachte, zusammengefaßte Angaben aufgeführt. Sie gehen von einer sog. »typischen Luftexplosion« aus, wie in Abschn. 2.47 definiert, mit einem Explosionswert von 20 Kilotonnen bzw. 1 Megatonne. Diese Angaben rühren von den in Japan gemachten Beobachtungen her sowie von mehreren Versuchsexplosionen von Kernwaffen, ferner von Berechnungen. Da es aber immer erhebliche Abweichungen gibt, die auf Unterschiede in Entwurf und Konstruktion auch bei Gebäuden anscheinend gleichen Typs zurückzuführen sind, sollen die Werte in den Tabellen nur hinsichtlich der »Durchschnitts«-Konstruktionen betrachtet werden. Einige Konstruktionen werden schwächer, andere wieder stärker als der Durchschnitt sein. Diese Einschränkungen muß man bei Benutzung der Tabellen ebenso beachten wie etwa eine Veränderung der Explosionshöhe. Um diese Zusammenstellung noch zu vervollständigen, sind einige charakteristische Eigenschaften der Druckstoßwelle bei verschiedenen Entfernungen beigefügt. Die angeführten dynamischen Drücke sind nur die horizontalen Komponenten (s. Abschn. 3.95).

Tabelle 4.135a Schadensbereiche bei typischer Luftexplosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers

Höchste Windgeschwindigkeit km/h	Dauer der positiven Phase Sek.	dynamischer Spitzendruck kg/cm²	Überdruckspitze atü	Entfernung vom Nullpunkt km	
					↑ leichte Schäden an Fensterrahmen und Türen; mittlere Putzschäden bis 6,4 km Umkreis; Glasbruch bis 12,8 km Umkreis möglich
64	1,27	–	0,08	4,2	gefüllte Öllagertanks: leichte Schäden
74	1,22	–	0,09	3,8	
85	1,17	–	0,11	3,5	
96	1,11	–	0,12	3,2	Fachwerkhäuser: mittlere Schäden
112	1,06	0,006	0,14	2,9	feines Anheizmaterial: entzündet Radio- und Fernsehsendetürme: leichte Schäden Schornsteine: leichte Schäden
138	1,00	0,011	0,18	2,6	Industriebauten, Leichtstahlgerippe, leichte Wände: mittlere Schäden Fachwerkhäuser: schwere Schäden
168	0,96	0,016	0,22	2,2	Motorfahrzeuge: leichte Schäden Radio- und Fernsehsendetürme: mittlere Schäden
213	0,91	0,027	0,28	1,9	Industriebauten, mittl. Stahlgerippe, leichte Wände: mittlere Schäden Telefon- und Starkstromleitungen: Grenze der größeren Schäden Fachwerkhäuser: zerstört Straßen- und Eisenbahnbrücken: leichte Schäden Backsteinbauten mit tragenden Wänden (Etagenwohnbauten): mittlere Schäden
245	0,85	0,049	0,38	1,6	Stahlgerippebauten (Bürogebäude) mit leichten Wänden: mittlere Schäden mehrstöckige Bauten, Stahlbetongerippe und -wände: mittlere Schäden Backsteinbauten mit tragenden Wänden (Etagenwohnbauten): schwere Schäden
374	0,78	0,084	0,532	1,3	Stahlbetongerippebauten, leichte Wände: mittlere Schäden Straßen- und Eisenbahn-Fachwerkbrücken: mittlere Schäden Industriebauten, mittelstarke Stahlgerippe, leichte Wände: schwere Schäden
470	0,71	0,154	0,700	1,0	mehrstöckige Bauten, Stahlbetongerippe und -wände: schwere Schäden
614	0,64	0,245	0,980	0,6	mehrstöckige Bauten mit massiven tragenden Wänden: mittlere Schäden Motorfahrzeuge: mittlere Schäden
490	0,55	0,175	1,680	0,3	Stahlgerippebauten mit leichten Wänden (Bürogebäude): schwere Schäden Gefüllte Öllagertanks: schwere Schäden Motorfahrzeuge: schwere Schäden luftdrucksichere, fensterlose Stahlbetonbauten: mittlere Schäden alle sonstigen (oberirdischen) Bauten: schwere Schäden oder zerstört
				0	Nullpunkt bei Luftexplosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers

Tabelle 4.135b *Schadensbereiche bei typischer Luftexplosion eines 1-Megatonnen-Sprengkörpers*

Höchste Windgeschwindigkeit km/h	Dauer der positiven Phase Sek.	dynamischer Spitzendruck kg/cm²	Überdruckspitze atü	Entfernung vom Nullpunkt km	
58	4,8	–	0,07	16	leichte Schäden an Fensterrahmen und Türen, mittlere Putzschäden bis etwa 24 km Umkreis; Glasbruch bis 48 km Umkreis möglich. gefüllte Öllagertanks: leichte Schäden feines Anheizmaterial: entzündet
69	4,6	–	0,08	14	Fachwerkhäuser: mittlere Schäden Radio- und Fernsehtürme: leichte Schäden
85	4,3	–	0,11	13	Schornsteine: leichte Schäden Industriebauten, Leichtstahlgerippe, leichte Wände: mittlere Schäden
100	4,0	0,006	0,13	11	Motorfahrzeuge: leichte Schäden Radio- und Fernsehsendetürme: mittlere Schäden
133	3,8	0,009	0,17	10	Fachwerkhäuser: schwere Schäden Industriebauten, mittl. Stahlgerippe, leichte Wände: mittlere Schäden
160	3,5	0,016	0,22	8	Telefon- und Starkstromleitungen: Grenze der größeren Schäden Straßen- und Eisenbahn-Fachwerkbrücken: leichte Schäden Stahlgerippebauten (Bürogebäude) mit leichten Wänden: mittlere Schäden
227	3,2	0,04	0,33	6,4	Fackwerkhäuser: zerstört Backsteinbauten mit tragenden Wänden (Etagenwohnbauten): mittlere Schäden Mehrstöckige Bauten, Stahlbetongerippe und -wände: mittlere Schäden Backsteinbauten mit tragenden Wänden (Etagenwohnbauten): schwere Schäden
365	2,9	0,08	0,52	5	Stahlbetongerippebauten mit leichten Wänden: mittlere Schäden Straßen- und Eisenbahn-Fachwerkbrücken: mittlere Schäden Industriebauten, Stahlgerippe, leichte Wände: schwere Schäden mehrstöckige Bauten (Hochbauten) mit Stahlbetongerippe und -wänden: schwere Schäden Hochbauten mit massiven tragenden Wänden: mittlere Schäden Bauten (Bürohäuser) mit Stahlgerippe und leichten Wänden: schwere Schäden Motorfahrzeuge: mittlere Schäden
507	2,6	0,18	0,77	3,2	gefüllte Öllagertanks: schwere Schäden Motorfahrzeuge: schwere Schäden
555	2,1	0,22	1,4	1,6	luftdrucksichere, fensterlose Stahlbetonbauten: mittlere Schäden alle sonstigen oberirdischen Bauten: schwer beschädigt oder zerstört
				0	Nullpunkt bei Luftexplosion eines 1-Mt-Atomsprengkörpers

KAPITEL V

Die Wirkungen von Boden- und Untererdexplosionen

Die Merkmale einer Bodenexplosion

Luftdruckwelle

5.1 In diesem Kapitel sind einige der Wirkungen von Kernexplosionen beschrieben, die an oder nahe der Erdoberfläche, in der Erde und unter Wasser erfolgen. Insbesondere sind hier die Punkte erörtert, die mit der Stoß-(oder Luftdruck-)Welle zusammenhängen, welche durch die rasche Ausdehnung der ungeheuer heißen Gase bei außerordentlich hohen Drücken in dem durch die Explosion gebildeten Feuerball erzeugt wird (s. Kap. II).

5.2 Als erstes wird die Bodenexplosion behandelt, d. i. eine Explosion, die entweder direkt an der Erdoberfläche erfolgt (bei Erdbodenberührung) oder in einer Höhe über der Erdoberfläche, bei der der Feuerball (mit maximaler Helligkeit) den Erdboden berührt oder schneidet. Obwohl ein Teil der Explosionsenergie durch Erzeugung eines Kraters verbraucht wird, wie wir gleich sehen werden, tritt doch ein beträchtlicher Teil als Luftdruckenergie in Erscheinung. Da die Explosion sehr nahe an der Erdoberfläche erfolgt, vereinigen sich die einfallende und die reflektierte Luftdruckwelle dicht am Nullpunkt. Wie in Kap. III dargelegt, verschmelzen bei einer Explosion direkt an der Erdoberfläche (oder bei Erdbodenberührung) die einfallende und die reflektierte Welle und bilden sofort eine halbkugelförmige Stoßfront, wie in Bild 3.29 dargestellt.

5.3 Die charakteristischen Eigenschaften der mit einer Bezugsexplosion (1 kt) am Erdboden verbundenen Luftstoßwelle als Funktion der Entfernung vom Nullpunkt sind am Schluß des Kap. III aufgezeigt. Das dort beschriebene Kubikwurzel-Umrechnungsgesetz kann für die Berechnung der Eigenschaften der Luftstoßwelle bei Bodenexplosion von Atomsprengkörpern jedes angegebenen Explosionswertes angewandt werden.

Kraterbildung

5.4 In Kap. II ist ausgeführt, daß bei einer Bodenexplosion eine beträchtliche Menge Materie auf Grund der außerordentlich hohen Temperaturen verdampft. Diese Materie wird durch die mit dem emporsteigenden Feuerball aufsteigenden Luftströme hochgesogen und kondensiert sich schließlich in der Atomwolke. In bezug auf die Kraterbildung ist die Verdrängung von Erde und anderem Material auf Grund des durch die rasche Ausdehnung der heißen Gasblase erzeugten Druckes ein viel bedeutsamerer Faktor. Die Verdrängung von Materie durch Herausstoßen, Heraus-

reißen und Herausschleudern ist bestimmend für den sich durch die Explosion bildenden Krater. Da die Gase sich nach außen ausdehnen, fällt nur sehr wenig Erde in das Loch zurück, obwohl eine beträchtliche Menge Erde sich rund um den Kraterrand ablagert und die oberen Schichten eines Kraterwalles bildet.

5.5 Nehmen wir der Einfachheit halber an, daß der Untergrund unter der Explosion aus trockenem Boden besteht, so können wir zwei mehr oder weniger deutlich erkennbare Zonen unmittelbar unter dem Krater unterscheiden. Da ist zunächst die »Bruchzone«, in der zahllose Risse von verschiedener Größe auf Grund des Zerreißens des Erdbodens vorhanden sind. Darunter liegt die »plastische Zone«, in der keine Risse sichtbar sind, obwohl der Erdboden bleibend verformt ist. Die plastische Verformung und die Verschiebung von Erdboden rund um den Kraterrand tragen zur Bildung des oben erwähnten »Walles« bei (Bild 5.5).

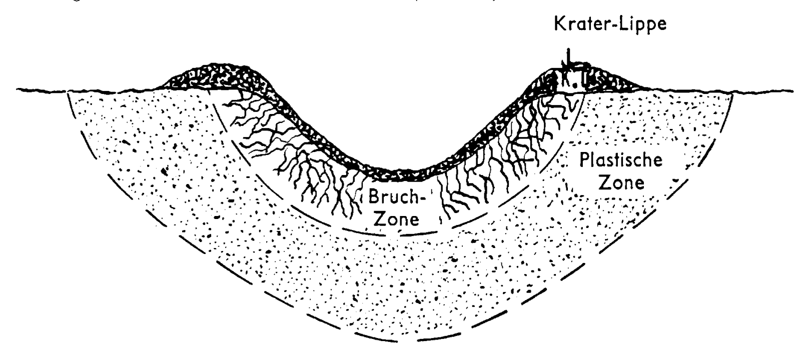


Bild 5.5 Bildung der plastischen Zone und der Bruchzone bei einer Bodenexplosion

5.6 Die Dicke der Bruchzone und der plastischen Zone hängt ab von der Art des Bodens sowie vom Explosionswert und dem Ort des Explosionspunktes. Besteht der Erdboden unter der Explosion aus Gestein, dann bildet sich eine Bruchzone, jedoch nur eine geringe oder gar keine plastische Zone. Abgesehen von Schäden an wenig widerstandsfähigen unterirdischen Bauten und einigen Versorgungsanlagen erstrecken sich die unterirdischen Wirkungen der Bodenexplosion nicht nennenswert über die Bruchzone hinaus, deren Radius etwa das Eineinhalbfache von dem des Kraters beträgt.

Kraterabmessungen

5.7 Es ist errechnet worden, daß bei einer Bodenexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers der Durchmesser des Kraters, d. h. des Loches, in trockenem Boden etwa 38 m beträgt; der Kraterwall erstreckt sich rundherum auf weitere 18 m. Die Kratertiefe beträgt wahrscheinlich etwa 7,5 m. In hartem Gestein (Granit und Sandstein) sind die Abmessungen etwas geringer. Bei wassergesättigtem Boden ist der Durchmesser erheblich größer; das gleiche gilt für die anfängliche Tiefe, von der auch die baulichen Schäden abhängig sind. Die endgültige Tiefe jedoch ist auf Grund des

»hydraulischen Ausfüllens«, d. h. auf Grund des Zurückfallens nasser Materie und des Nachsickerns von Wasser, das mit loser Erde durchsetzt ist, geringer.

5.8 Der Durchmesser (oder Radius) des Kraters nimmt etwa proportional der Kubikwurzel des Explosionswertes zu. Somit beträgt bei einer Explosion von W kt der Durchmesser $W^{1/3}$ mal den vorstehend für eine 1-kt-Explosion angegebenen Wert. Die Kratertiefe wird für die meisten Bodenarten mit der vierten Wurzel des Explosionswertes errechnet, d. h. sie nimmt um einen Faktor $W^{1/4}$ zu. Zum Beispiel beträgt bei Explosion eines 100-kt-Atomsprengkörpers in trockenem Boden der Kraterdurchmesser etwa $38 \times (100)^{1/3}$ = etwa 177 m und die Kratertiefe $65 \times (100)^{1/4}$ = etwa 24 m. Kurven, die die Veränderung des Kraterdurchmessers und der Kratertiefe mit dem Explosionswert bei einer Bodenexplosion in trockenem Boden sowie die Korrekturfaktoren für andere Bodenarten aufzeigen, sind gegen Ende dieses Kapitels (Bild 5.46) gegeben.

5.9 Die vorstehend angegebenen Ergebnisse gelten für Bodenexplosionen. Mit zunehmender Explosionshöhe verändern sich die Kraterabmessungen auf Grund des veränderten Vorgangs der Kraterbildung in ziemlich komplizierter Weise. Als ungefähres Richtmaß kann gesagt werden, daß der Radius und insbesondere die Tiefe des Loches mit zunehmender Explosionshöhe rasch abnehmen. Wenn die Explosion in einer Höhe erfolgt, in der der Feuerball den Erdboden nur eben berührt, ist die Kraterbildung schon längt unbedeutend geworden. Wenn sich ein größerer Krater bilden soll, so darf die Explosionshöhe nicht mehr als etwa $^1/_{10}$ des Feuerballradius betragen.

Erdstoßwelle

5.10 Bei einer Kernexplosion an der Erdoberfläche wird ein kleiner Teil der Explosionsenergie für die Erzeugung der Stoß-(oder Druck-)Welle im Erdboden verbraucht, von der zur Zeit nur die allgemeinen Merkmale bekannt sind. Diese Druckwelle unterscheidet sich von der Luftstoßwelle dadurch, daß ihr Druckanstieg an der Front viel weniger plötzlich ist; auch läßt die Erdstoßwelle weniger rasch nach. In unmittelbarer Nähe der Explosion ist das Druck- oder Stoßgefälle groß genug, um die Kohäsionskraft im Erdboden zu zerstören. Die Stärke der Druckwelle schwächt sich mit zunehmender Entfernung von der Explosion ziemlich rasch ab und wird bei großen Entfernungen einer Schall-(oder seismischen)Welle ähnlich.

5.11 In der Beschreibung der Wirkungen der Erdstoßwelle ist gesagt worden, daß diese etwa einem Erdbeben mittlerer Stärke ähnlich sind. Trotzdem bestehen (wie in Abschn. 2.69 dargelegt) bedeutende Unterschiede zwischen einer Kernexplosion in der Erde und einem Erdbeben. Der Druck der Erdstoßwellen fällt bei einer Kernexplosion mit zunehmender Entfernung rasch ab, und bei einer Bodenexplosion ist der Schadensbereich auf Grund der Erdstoßwelle (oder der »Erdbebenwirkung«) im Vergleich zu dem des Luftstoßes gering.

5.12 Die Erdstoßwellen sind kompliziert, aber ihre allgemeinen Merkmale können kurz zusammengefaßt werden. An der Erdoberfläche bewegt sich eine Reihe

von Wellen in etwa ähnlicher Weise wie Wasserwellen nach außen. Diese vom Nullpunkt ausgehenden Wellen erzeugen die sog. »Bodenwalze«, die an jedem beliebigen Punkt als Schwingung der Erdoberfläche empfunden wird, wenn die Wellen vorbeikommen. Außerdem erzeugt ein Impuls, der von der sich ausdehnenden Gasblase nach außen, entlang einer ungefähr halbkugeligen Wellenfront von ständig zunehmender Größe fortschreitet, Druck- und Schubwellen unter der Erdoberfläche.

5.13 Die Wirkung des *Druckes der Erdstoßwelle* auf ein unterirdisches Gebäude unterscheidet sich in ihren Merkmalen etwas von der Wirkung des Luftstoßes auf ein oberirdisches Bauwerk. Wie in Kap. III dargelegt, erfährt im letzteren Falle das Gebäude eine Art plötzlichen Stoß, dem ein Widerstand auf Grund des Luftstoßwindes folgt. Mit einer Untergrunderschütterung ist diese Art des Verhaltens nicht verbunden. Da das Medium, durch welches die Erdstoßwelle geht, ähnliche Dichte hat wie das unterirdische Gebäude, stehen die Reaktion des Erdbodens und die des Bauwerks in enger Wechselbeziehung. Mit anderen Worten: die Bewegung (Beschleunigung, Geschwindigkeit und Verschiebung) des unterirdischen Bauwerks durch die Erdstoßwelle ist weitgehend von der Bewegung des Erdbodens selbst abhängig. Diese Tatsache hat einen bedeutenden Einfluß auf die Schadensmerkmale, die sowohl mit einer Bodenexplosion als auch mit einer Untererdexplosion verbunden sind. Diese Merkmale sind nachstehend erörtert und in Kap. VI ausführlicher behandelt.

Die Merkmale einer Untererdexplosion

Luftstoß

5.14 Eine Untererdexplosion wird mit allgemeinen Begriffen definiert als eine Explosion, deren Zentrum unter der Erdoberfläche liegt (Abschn. 1.29). Praktische Überlegungen lassen jedoch annehmen, daß eine Explosion in einer Tiefe von mehr als etwa 15–30 m ziemlich unwahrscheinlich ist. Das bedeutet, daß nur solche unterirdischen Kernexplosionen näher betrachtet zu werden brauchen, bei denen der Feuerball oder die heißen, unter hohem Druck stehenden Gase die Erdoberfläche durchbrechen. Eine Explosion dieser Art hat offensichtlich viele gemeinsame Merkmale mit einer Bodenexplosion.

5.15 Der Teil der Energie des Atomsprengkörpers, der als Luftstoß in Erscheinung tritt, hängt weitgehend von den näheren Umständen der Explosion, insbesondere von ihrer Tiefe, ab. Erfolgt die Explosion nur etwa 1 m unter der Erdoberfläche, dann ist die Situation nicht viel anders als bei einer Explosion direkt an der Erdoberfläche (oder bei Erdbodenberührung). Mit zunehmender Tiefe der Explosion nimmt die Energie des Luftstoßes ab, und die Abschwächung der Überdruckspitze mit der Entfernung erfolgt schneller. Infolgedessen ist der Luftstoßüberdruck in einem gegebenen Bereich bei Explosionen in größerer Tiefe etwas niedriger.

Kraterbildung und Erdstoßwelle

5.16 Die Größe des Kraters, der bei einer Untererdexplosion ganz dicht unter der Erdoberfläche entsteht, ist im wesentlichen die gleiche wie bei einer Bodenexplosion (s. o.). Mit zunehmender Tiefe der Explosion erscheint ein abnehmender Bruchteil der Explosionsenergie als Luftstoßwelle, während ein zunehmender Bruchteil für die Erzeugung des Erdstoßes und die Kraterbildung verbraucht wird. Deshalb nehmen bis zu einem bestimmten Punkt der Kraterdurchmesser und der Kraterradius mit zunehmender Explosionstiefe zu.

Weitere Angaben hierüber sind in dem technischen Teil dieses Kapitels (Bild 5.46) zu finden.

5.17 Die charakteristischen Merkmale der mit einer unterirdischen Explosion verbundenen Erdstoßwelle sind ganz ähnlich wie die weiter oben im Zusammenhang mit einer Bodenexplosion beschriebenen. Der Bruchteil der Energie, der für die Erdstoßwelle verbraucht wird, ist nicht genau bekannt, aber er steigt mit zunehmender Explosionstiefe bis zu einem begrenzten Wert an.

Schadensmerkmale

Bodenexplosionen

5.18 Bei einer Explosion nahe der Erdoberfläche in mittlerer Höhe über der Erde ist der entstehende Krater oder die Bodensenkung nicht sehr tief. In geringer Tiefe unter der Erde befindliche Bauten in der Nähe des Nullpunktes werden durch diese Bodensenkung beschädigt, aber tieferliegende Bauten werden kaum betroffen. Wie in Abschn. 5.6 gesagt, erstreckt sich die Beschädigung unterirdischer Bauten und Versorgungsleitungen wahrscheinlich nicht auf größere Entfernungen als das $1^1/_2$fache des Kraterradius. Bei Bauten über dem Erdboden hängt der Schadensbereich genau wie bei einer Luftexplosion von den Merkmalen der Luftstoßwelle ab, (s. Kap. III). Das von dem Luftstoß betroffene Gebiet ist weit größer als das Gebiet, in dem Schäden durch Bewegung (oder Erschütterung) des Erdbodens entstehen. Bei einer Explosion mit Bodenberührung oder in der Nähe der Erdoberfläche ist die Situation ähnlich wie bei einer Untererdexplosion (s. u.).

Untererdexplosionen

5.19 Die mit einer Untererdexplosion und einer Bodenexplosion im Zusammenhang mit unterirdischen Bauten verbundenen Schadensmerkmale sind schwer zu definieren. Eine einfache und praktische Methode ist, 3 Bereiche rund um den Nullpunkt zu betrachten, d. h. rund um den Punkt an der Erdoberfläche, der direkt über

der Untererdexplosion liegt. Der erste Bereich ist der des Kraters. Innerhalb dieses Bereiches wird praktisch alles zerstört, was sich über und unter der Erdoberfläche befindet; deshalb ist hierüber nichts weiter zu sagen.

5.20 Der zweite Bereich erstreckt sich ungefähr bis zum Ende der plastischen Zone, d. h. so weit, wie Bodenverschiebungen auftreten (s. Abschn. 5.5). Bei manchen Bodenarten beträgt der Radius dieses Bereiches ungefähr das $2^1/_2$fache des Kraterradius. Innerhalb dieses Bereiches werden massive und gut konstruierte unterirdische Bauten wahrscheinlich nur geringfügig durch den Luftstoß beschädigt, und es entstehen Schäden durch die Wirkungen der Erdstoßwelle und der Bodenbewegung. Der durch diese Ursachen entstehende Schaden hängt von mehreren, mehr oder weniger unabhängigen Faktoren ab, z. B. von der Größe, der Form und der Elastizität des Bauwerks, seiner Lage zum Explosionszentrum und den Bodenmerkmalen. Einige dieser Faktoren sind ausführlicher in Kap. VI behandelt.

5.21 Neben unterirdischen Bauten sind auch unterirdische Versorgungsleitungen, Tunnels und Untergrundbahnen zu erwähnen. Lange Rohrleitungen werden hauptsächlich durch die veränderlichen Bewegungen an den Verbindungsstücken und an den Stellen, wo die Leitung in ein Gebäude führt, beschädigt. Eine Zerstörung tritt wahrscheinlich ein, wenn die Rohrverbindungen aus zerbrechlichem Material bestehen und starr mit dem Gebäude verbunden sind. Obwohl Tunnels und Untergrundbahnen innerhalb des Kraterbereiches wahrscheinlich zerstört und im Bereich der plastischen Zone einige Schäden entstehen würden, sind diese Anlagen, insbesondere, wenn sie durch harten Fels getrieben und so umkleidet sind, daß ein Absplittern auf ein Mindestmaß begrenzt wird, gegen unterirdische Stöße sehr widerstandsfähig.

5.22 Im dritten Bereich jenseits der plastischen Zone sind die Wirkungen der Erdstoßwelle verhältnismäßig unbedeutend; dann wird die Luftstoßbelastung zu dem bedeutendsten Merkmal der baulichen Schäden. Massive oder tief angelegte unterirdische Bauwerke werden nicht sehr stark betroffen, aber die Schäden an ziemlich leichten, in geringer Tiefe angelegten Bauten und manchen Versorgungsleitungen werden weitgehend durch den Druck nach unten bestimmt, d. h. durch die Überdruckspitze des Luftstoßes, der mit einer Bodenexplosion oder Untererdexplosion verbunden ist. Bauten, die teils über, teils unter der Erde liegen, werden natürlich auch durch den direkten Luftstoß betroffen.

Die Merkmale einer Unterwasserexplosion

Wasserstoßwelle

5.23 Die rasche Ausdehnung der bei einer Kernexplosion unter Wasser entstehenden Gasblase erzeugt eine Wasserstoßwelle, die nach allen Richtungen durch das Wasser geht. Die Wasserstoßwelle ist in ihrer Gesamtheit ähnlich wie die Luftstoßwelle, obwohl sie in ihren Einzelheiten sich von ihr unterscheidet. Genau wie in der

Luft erfolgt an der Stoßfront ein scharfes Ansteigen des Überdruckes. Im Wasser jedoch fällt die Überdruckspitze nicht so rasch mit zunehmender Entfernung ab wie in der Luft. Deshalb sind bei gleicher Entfernung von einer Explosion bei gleichem Explosionswert die Spitzenwerte im Wasser viel höher als in der Luft. Zum Beispiel beträgt die Überdruckspitze in einer Entfernung von 914 m von einer 100-kt-Explosion tief unter Wasser etwa 189 kg/cm² im Vergleich zu nur etwa 0,2 kg/cm² bei einer Luftexplosion. Außerdem ist die Dauer der Wasserstoßwelle kürzer als die der Luftstoßwelle. Im Wasser beträgt sie etwa einige Hundertstelsekunden, in der Luft dagegen etwa eine Sekunde.

5.24 Die Schallgeschwindigkeit im Wasser beträgt unter normalen Verhältnissen etwa 1600 m/sec, d. i. fast 5mal so viel wie in der Luft. Wenn der Spitzendruck hoch ist, dann ist die Geschwindigkeit der Wasserstoßwelle größer als die normale Schallgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit der Stoßfront wird bei niedrigeren Überdrücken geringer und nähert sich schließlich, genau wie in der Luft, der Schallgeschwindigkeit.

5.25 Trifft die Wasserstoßwelle auf eine starre Fläche unter Wasser auf, z. B. auf einen Schiffskörper oder auf den Meeresgrund, dann erfolgt, ebenso wie in der Luft, eine Reflexion. Die direkte und die reflektierte Welle können sich unter gewissen Umständen sogar zu einer Stoßfront von besonders starkem Druck vereinigen. Wenn jedoch die Wasserstoßwelle die Wasseroberfläche erreicht, dann treten völlig veränderte Reflexionserscheinungen auf.

5.26 An der Fläche zwischen Wasser und Luft trifft die Wasserstoßwelle auf ein viel weniger starres Medium auf, nämlich auf Luft. Dadurch wird eine reflektierte Welle ins Wasser zurückgesandt, aber dies ist eine Sogwelle. An einem Punkt unter der Wasseroberfläche erzeugt die Vereinigung der reflektierten Sogwelle mit der direkten Welle ein scharfes Abfallen des Wasserstoßwellen-Druckes. Dies wird Abfallen genannt.

5.27 Die Veränderung des Stoßwellen-Überdruckes an einem gegebenen Ort mit zunehmender Zeit nach der Explosion an einem Punkt unter Wasser, nicht zu weit von der Wasseroberfläche entfernt, ist in Bild 5.27 gezeigt. Nach Ablauf einer kurzen Zeitspanne, d. h. nach Ablauf der Zeit, die die Wasserstoßwelle benötigt, um vom Explosionspunkt zu dem gegebenen Ort zu wandern, steigt der Überdruck auf Grund der Ankunft der Stoßfront plötzlich stark an. Wie in der Luft, läßt der Druck dann ständig nach. Bald darauf bewirkt die Ankunft der von der Oberfläche reflektierten Sogwelle einen scharfen Druckabfall sogar bis unter den normalen (hydrostatischen) Wasserdruck. Diese negative Druckphase ist von kurzer Dauer.

5.28 Der Zeitraum zwischen der Ankunft der direkten Stoßwelle an einem bestimmten Ort (oder Ziel) im Wasser und die Zeitdauer des Druckabfalles, der die Ankunft der reflektierten Welle ankündigt, sind abhängig von der Tiefe der Explosion, der Tiefe des Zieles und der Entfernung vom Explosionspunkt bis zum Ziel. Wie aus Bild 5.28 ersichtlich, bestimmen diese 3 Strecken die Länge des von der direkten und der reflektierten Stoßwelle zurückgelegten Weges bis zur Erreichung des Zieles. Liegt das Unterwasserziel dicht unter der Wasseroberfläche, wie dies z. B.

beim Boden eines Schiffes der Fall ist, dann ist der zwischen der Ankunft der beiden Stoßfronten liegende Zeitraum kurz, und das Abfallen des Druckes tritt bald nach Ankunft der Stoßfront ein. Dies kann eine Verringerung des Schadensausmaßes an dem Ziel zur Folge haben.

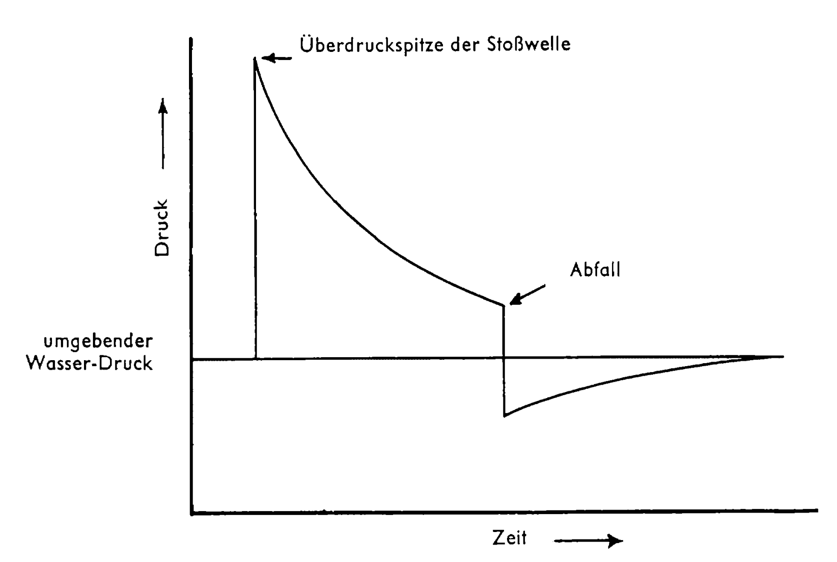


Bild 5.27 Veränderung des Wasserdruckes mit der Zeit bei einer Unterwasserexplosion an einem Punkt nahe der Wasseroberfläche

Schäden durch Wasserstoßwellen

Allgemeine Merkmale

5.29 Das Auftreffen einer Wasserstoßwelle auf ein Schiff oder ein Bauwerk, z. B. eine Hafenmole oder einen Deich, stellt einen plötzlichen Schlag dar. Stöße dieser Art sind aus Unterwasserdetonationen von TNT (Trinitrotoluol) und anderen chemischen Sprengstoffen bekannt. Aber während die durch eine solche Detonation erzeugte Stoßwelle örtlich begrenzt ist, wirkt der Stoß einer Kernexplosion fast augenblicklich auf eine große Fläche, z. B. auf ein ganzes Schiff.

5.30 Die Wirkungen einer Kernexplosion unter Wasser auf ein Schiff sind zweierlei Art:

1. die direkte Wirkung des Stoßes auf den Schiffsrumpf;

2. die indirekten Wirkungen auf Grund der durch den Stoß in Bewegung gesetzten inneren Schiffsteile.

Die auf den Schiffsrumpf einwirkende Wasserstoßwelle verursacht eine Zerstörung des Schiffsrumpfes unter der Wasseroberfläche und eine Beschädigung der äußeren Schiffsverkleidung, wodurch Lecks entstehen und das Schiffsgerippe schwer beansprucht wird.

Die Wasserstoßwelle verursacht auch eine rasche Verschiebung in waagerechter und senkrechter Richtung. Diese Verschiebung läßt Stoßschäden an inneren Teilen und der Einrichtung des Schiffes entstehen.

5.31 Die Hauptzuleitungen, Hauptdampfleitungen, die Schraubenwelle und die Kesselverkleidung innerhalb des Schiffes sind besonders empfindlich gegen Stoßwellen. Auf Grund des Beharrungsvermögens stürzen die Tragstützen oder Fundamente schwerer Schiffszubehörteile, wie Maschinen und Kessel, leicht ein oder werden beschädigt. Leichtere oder ungenügend befestigte Gegenstände werden mit großer Heftigkeit umhergeworfen, wobei sie selbst beschädigt werden und Schäden an den Zwischenwänden und anderen Einrichtungsstücken verursachen. Stoßfest montierte Ausstattungsstücke werden wahrscheinlich weniger schwer beschädigt.

5.32 Die Beschädigung der Schiffswandungen hängt hauptsächlich von der Überdruckspitze der Wasserstoßwelle ab. Das gleiche gilt wahrscheinlich für Kanalschleusentore und Trockendocktore. Innerhalb des Bereiches sehr hoher Drücke an der Stoßfront erleiden solche Bauwerke wahrscheinlich beträchtlichen Schaden. Die Beschädigung großer, starrer unterirdischer Bauwerke, wie z. B. Hafenanlagen, ist dagegen mehr von dem Impuls der Stoßwelle abhängig. Der Impuls hängt ab von der Dauer der Wasserstoßwelle und von deren Druck.

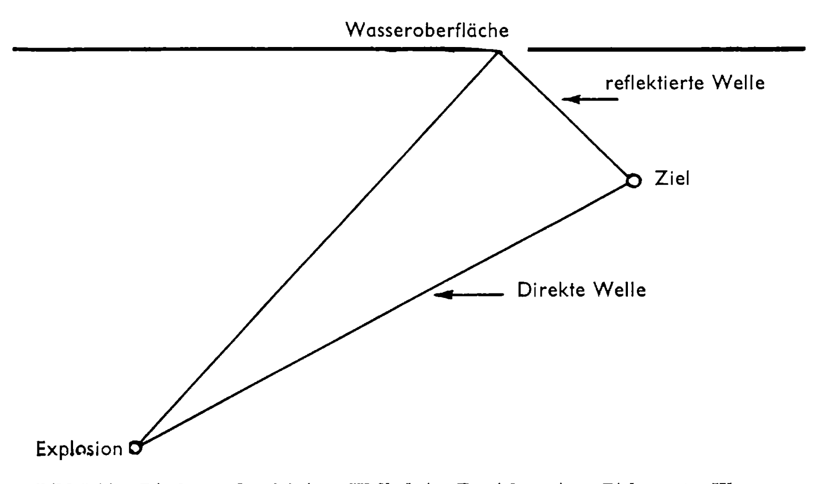


Bild 5.28 Direkte und reflektierte Welle beim Erreichen eines Zieles unter Wasser

Die Erfahrungen von Bikini

5.33 Bei dem in geringer Tiefe unter Wasser durchgeführten Kernexplosionsversuch in Bikini im Juli 1946 (s. Beschreibung in Kap. II) wurden etwa 70 Schiffe verschiedener Typen rund um den Explosionspunkt verankert. Obwohl die Explosion von einer Luftstoßwelle von beträchtlicher Energie begleitet war, entstand der Hauptschaden an den Schiffen in der Lagune durch die Stoßwelle, die durch das Wasser übertragen wurde. Aus den nach der Explosion angestellten Beobachtungen wurden allgemeine Schlußfolgerungen gezogen, und diese sind hier wiedergegeben. Zu bemerken ist jedoch, daß die Art und das Ausmaß der Schäden an einem Schiff auf dem Wasser auf Grund der Wasserstoßwelle von der Explosionstiefe, dem Schiffstyp, ob das Schiff fährt oder vor Anker liegt, und seiner Lage zur Explosion abhängt.

5.34 Bei Unterwasserexplosionen in geringer Tiefe – ähnlich wie bei dem *Baker*-Versuch – ist der Überdruck der Stoßwelle, der Schiffe von einigermaßen stabiler Konstruktion zum Sinken bringt, wahrscheinlich für alle Schiffstypen ziemlich gleich, d. h. etwa 210–280 kg/cm². Manche Schiffe sinken vielleicht schon bei einem Überdruck von 140 kg/cm², und die übrigen, die nicht untergehen, werden derartig beschädigt, daß sie fast unbrauchbar werden. Die meisten Schiffe werden durch Überdruckspitzen bis herunter zu 70 kg/cm² fahruntüchtig. Bei niedrigeren Drücken entsteht der meiste Schaden eher am Schiffszubehör als an den Schiffswandungen.

5.35 Bei einer Unterwasserexplosion in geringer Tiefe werden Kessel und Hauptantriebsmaschinen auf Grund der durch die Wasserstoßwelle an den Stellen verursachten Bewegung, wo der Überdruck etwa 175 kg/cm² beträgt, schwer beschädigt; dort, wo die Drücke 140 kg/cm² betragen, ist die Beschädigung geringer, und bei 70 kg/cm² entstehen leichte Schäden. Die mit dem Schiffsantrieb zusammenhängenden Zusatzgeräte werden nicht so stark beschädigt, jedoch werden bei Wasserstoßdrücken bis hinunter zu 35 kg/cm² leichte innere Schiffszubehörteile beschädigt. In Fahrt befindliche Schiffe erleiden vielleicht etwas stärkere Beschädigung an ihren Maschinen als vor Anker liegende Schiffe.

Luftstoß bei Unterwasserexplosionen

5.36 Obwohl der größte Teil der Stoßwellenenergie bei einer Unterwasserexplosion in geringer Tiefe durch das Wasser weitergeleitet wird, wird eine beträchtliche Energiemenge durch die Wasseroberfläche als Stoß-(oder Druck-)Welle in die Luft übertragen (Abschn. 5.15). Bei dem *Baker*-Test in Bikini verursachte der Luftstoß zweifellos Schäden an dem Oberbau der Schiffe; diese Schäden waren aber unbedeutend im Vergleich zu den durch die Wasserstoßwelle verursachten Schäden. Die Hauptwirkung der Luftstoßwelle würde wahrscheinlich am Land befindliche Ziele treffen, wenn der Atomsprengkörper nicht zu weit vom Ufer explodieren würde. Die Schadensmerkmale wären dann die gleichen wie bei einer Luftexplosion bei entsprechenden Überdrücken und dynamischen Drücken.

Wasserwellen bei Unterwasserexplosionen

5.37 Eine kurze Darstellung der Wasserwellenerscheinungen, die bei dem *Baker*-Test in Bikini beobachtet wurden, ist in Kap. II gegeben. Hier sind nun weitere Einzelheiten, insbesondere bezüglich der zerstörenden Wirkungen dieser Wellen, aufgeführt. Die erste nach der Unterwasserexplosion entstandene Welle bestand aus einem Wellenberg, dem ein Wellental folgte, welches sich so weit unter den Wasserspiegel senkte, wie der Wellenberg sich darüber erhob. Darauf folgte eine Reihe von Wellen, deren Zahl sich steigerte, je mehr das Wellensystem sich vom Explosionspunkt nach außen bewegte. Das Aussehen des Wassers zu der Zeit, als die Wellen den 17,6 km entfernten Strand erreichten, ist in Bild 5.37 dargestellt.

5.38 Die Beobachtung der Eigenschaften der Wellen zeigte, daß die erste Welle sich insofern anders verhielt als die folgenden, als sie offensichtlich eine lange Einzelwelle war, die direkt durch die Explosion erzeugt wurde und ihre anfängliche Energie durch die sehr schnelle Auswärtsbewegung des Wassers empfangen hatte, die die

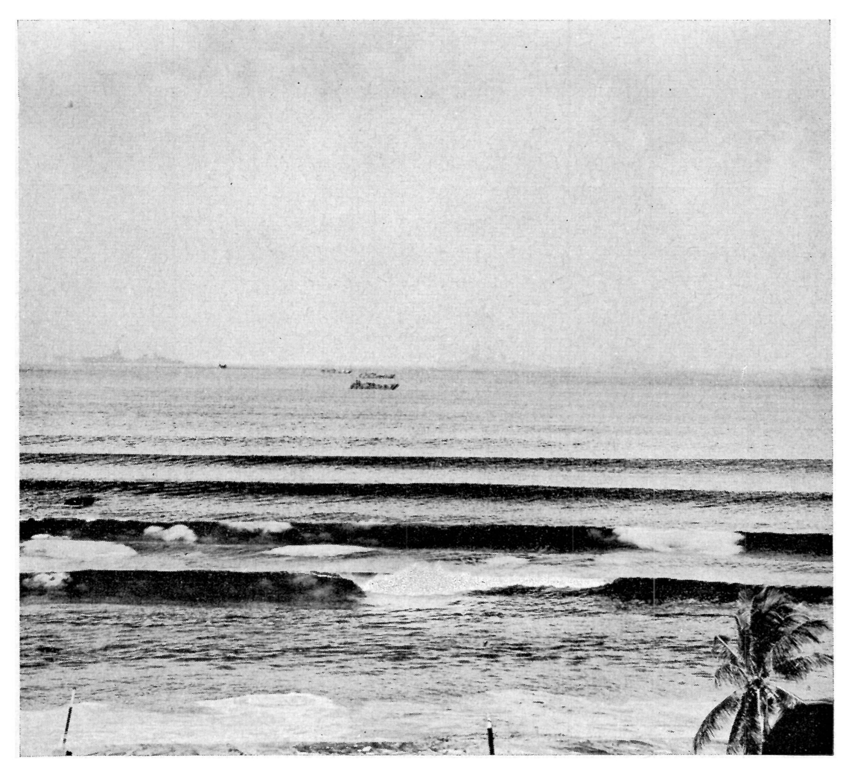


Bild 5.37 Wellen aus der Unterwasserexplosion »Baker«, die den 17,6 km vom Nullpunkt entfernten Strand in Bikini erreichen.

Ausdehnung der Gasblase begleitete. Die nachfolgenden Wellen entstanden wahrscheinlich durch das Ausströmen der Gasblase und das Auffüllen des Hohlraumes im Wasser.

5.39 In der Nähe der Explosion war der erste Wellenberg etwas höher als die nachfolgenden, sowohl über dem glatten Wasserspiegel als auch in seiner Gesamthöhe über dem nachfolgenden Wellental. Bei größeren Entfernungen vom Explosionspunkt lag die höchste Welle in dem nachfolgenden Wellenzug. Die maximale Höhe dieses Wellenzuges schien mit zunehmender Entfernung vom Explosionszentrum rückwärts zu immer späteren Wellen zu wandern.

5.40 In Tabelle 5.40 sind die maximalen Höhen und die Ankunftszeiten der Wasserwellen (nicht immer der ersten Welle) aus der Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe unter Wasser bei verschiedenen Entfernungen vom Nullpunkt angegeben. Diesen Ergebnissen liegen die bei dem *Baker*-Versuch in Bikini angestellten Beobachtungen zugrunde. Weiter unten in diesem Kapitel ist eine allgemeinere Betrachtung der Wellenhöhen gegeben, die für beliebige Explosionswerte in geringer Tiefe unter Wasser in Frage kommen.

Tabelle 5.40 Maximale Höhen (Wellenberg bis Wellental) und Ankunftszeiten der Wasserwellen bei dem BAKER-Versuch in Bikini

Entfernung (m)	302	604	1216	1829	2469	3018	3658
Wellenhöhe (m)	29	14	7	1,83	0,91	3,35	2,74
Zeit (Sekunden)	11	23	48	74	101	127	154

5.41 Es ist wahrscheinlich, daß die großen Wellen für einen Teil der beim *Baker*-Versuch eingetretenen Schiffsschäden verantwortlich zu machen waren. Einen ziemlich klaren Beweis für die Zerstörungen, die die Wasserwellen an dem amerikanischen Flugzeugträger »Saratoga« verursachten, welcher mit seinem Heck 360 m vom Nullpunkt entfernt vor Anker lag, lieferte eine Reihe von Photographien, die in Zwischenräumen von 3 Sekunden aufgenommen wurden. Eine Aufnahme, die gemacht wurde, bevor eine sichtbare Stoßwellenwirkung die »Saratoga« erreicht hatte, zeigt, daß die Kommandobrücke und der Radarmast unbeschädigt waren. Auf einer 9 Sekunden später aufgenommenen Photographie sieht man, daß der Radarmast von der Luftstoßwelle verbogen ist, aber die Kommandobrücke ist noch die gleiche. Dieses Bild zeigt, wie das Schiffsheck sich auf den Kamm der ersten Welle hebt, d. i. etwa 13 m über der vorigen Position; kurz darauf jedoch verdeckte die Bodenwalze den Blick auf das Schiff.

5.42 Als die »Saratoga« wieder sichtbar wurde, nachdem die größeren Wellen und sonstigen Wirkungen sich gelegt hatten, wurde festgestellt, daß der mittlere Teil der Kommandobrücke über dem Deck des Flugzeugträgers zusammengefallen war (Bild 5. 42). Es ist höchst wahrscheinlich, daß die »Saratoga« kurz nach ihrem Erheben auf den ersten Wellenberg in das nachfolgende Wellentag gestürzt war und von dem zweiten Wellenberg schwer angeschlagen wurde, wodurch die Beschädigung der Kommandobrücke verursacht wurde.

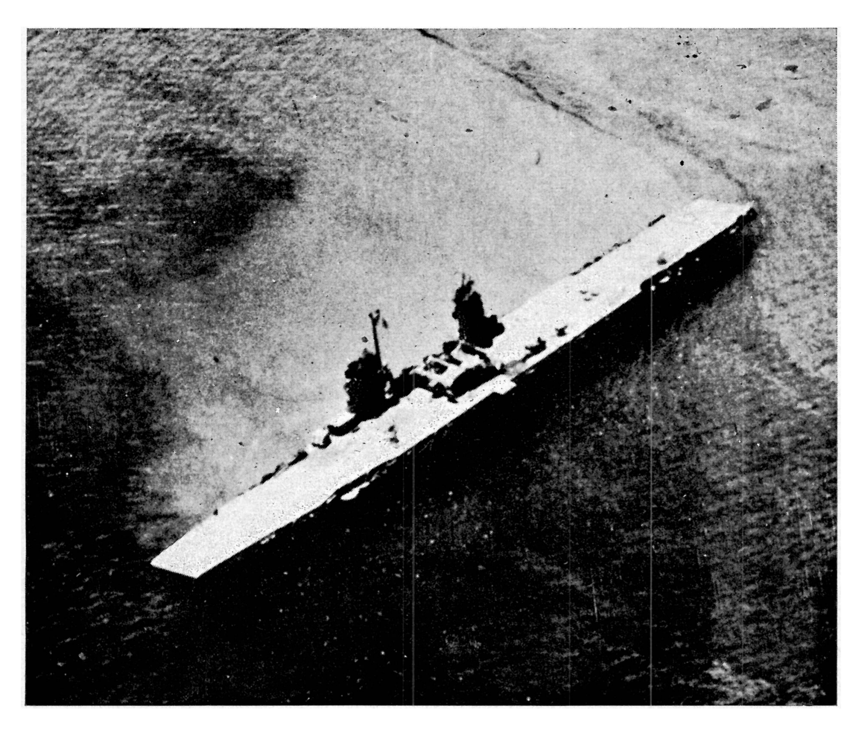


Bild 5.42 Der amerikanische Flugzeugträger »Saratoga« nach der »BAKER«-Explosion

Veränderungen auf dem Grund der Lagune

5.43 Die Explosion des *Baker*-Sprengkörpers in Bikini verursachte eine merkliche Zunahme der Lagune an Tiefe über eine Fläche von etwa 610 m im Durchmesser. Die größte sichtbare Tiefenänderung betrug 9,75 m; dies stellt jedoch eher die Beseitigung einer Bodenerhöhung als die Aushöhlung einer vorher ebenen Fläche dar. Vor dem Versuch war an Ablagerungsproben vom Grunde der Lagune festgestellt worden, daß diese aus grobkörnigen Algenablagerungen, gemischt mit weniger als 10% Sand und Schlamm, bestanden. Die nach der Explosion entnommenen Proben waren jedoch ganz anders. Statt der Algenablagerungen fand man bis zu etwa 3 m dicke Schlammschichten auf dem Grunde der Lagune in der Nähe des Explosionspunktes. Weitere Angaben über Kraterbildung bei Unterwasserexplosionen sind am Schluß des Kapitels aufgeführt.

Die technischen Grundlagen von Boden- und Untererdexplosionen[1])

Kratergröße bei Bodenexplosionen

5.44 Außer der Bruchzone und der plastischen Zone, die bereits definiert worden sind, können noch zwei andere Merkmale eines Kraters beschrieben werden: der »scheinbare« Krater und der »tatsächliche« Krater. Der scheinbare Krater, der den Durchmesser D_a und die Tiefe H_a hat (s. Bild 5.44), ist die Oberfläche der Bodensenkung oder des Loches, das nach der Explosion im Erdboden verbleibt. Der tatsächliche Krater mit dem Durchmesser D_t ist dagegen die Fläche, die sich über den scheinbaren Krater hinaus erstreckt und wo ein endgültiges Auswerfen stattgefunden hat. Das Volumen des (scheinbaren) Kraters, der als ungefähr parabolisch angenommen wird, ist gegeben durch

$$\text{Kratervolumen} = \frac{\pi D_a^2 H_a}{8}$$

Verwenden wir die in Abschn. 5.7 gemachten Angaben, so stellen wir fest, daß das Kratervolumen bei einer 1-kt-Explosion an der Erdoberfläche bei trockenem Boden etwa 4250 m³ beträgt und fast 7500 t wiegt.

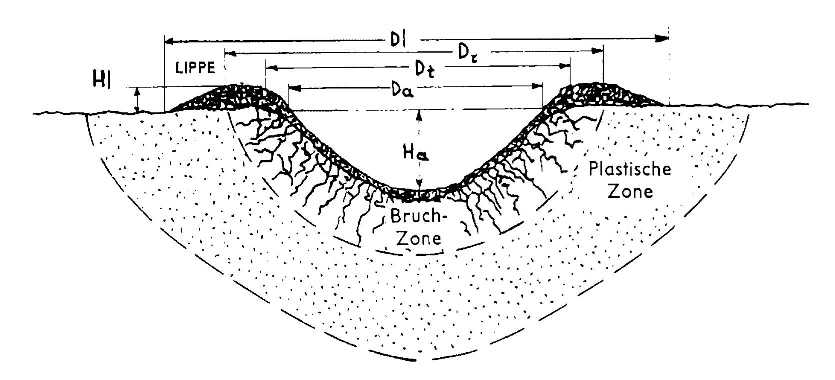


Bild 5.44 Die charakteristischen Abmessungen eines Kraters bei Bodenexplosion

5.45 Der Durchmesser der Bruchzone, der in Bild 5.44 mit D_r bezeichnet ist, beträgt rund das Eineinhalbfache des Kraterdurchmessers, d. h.

$$D_r \approx 1{,}5\, D_a\,.$$

[1]) Die restlichen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

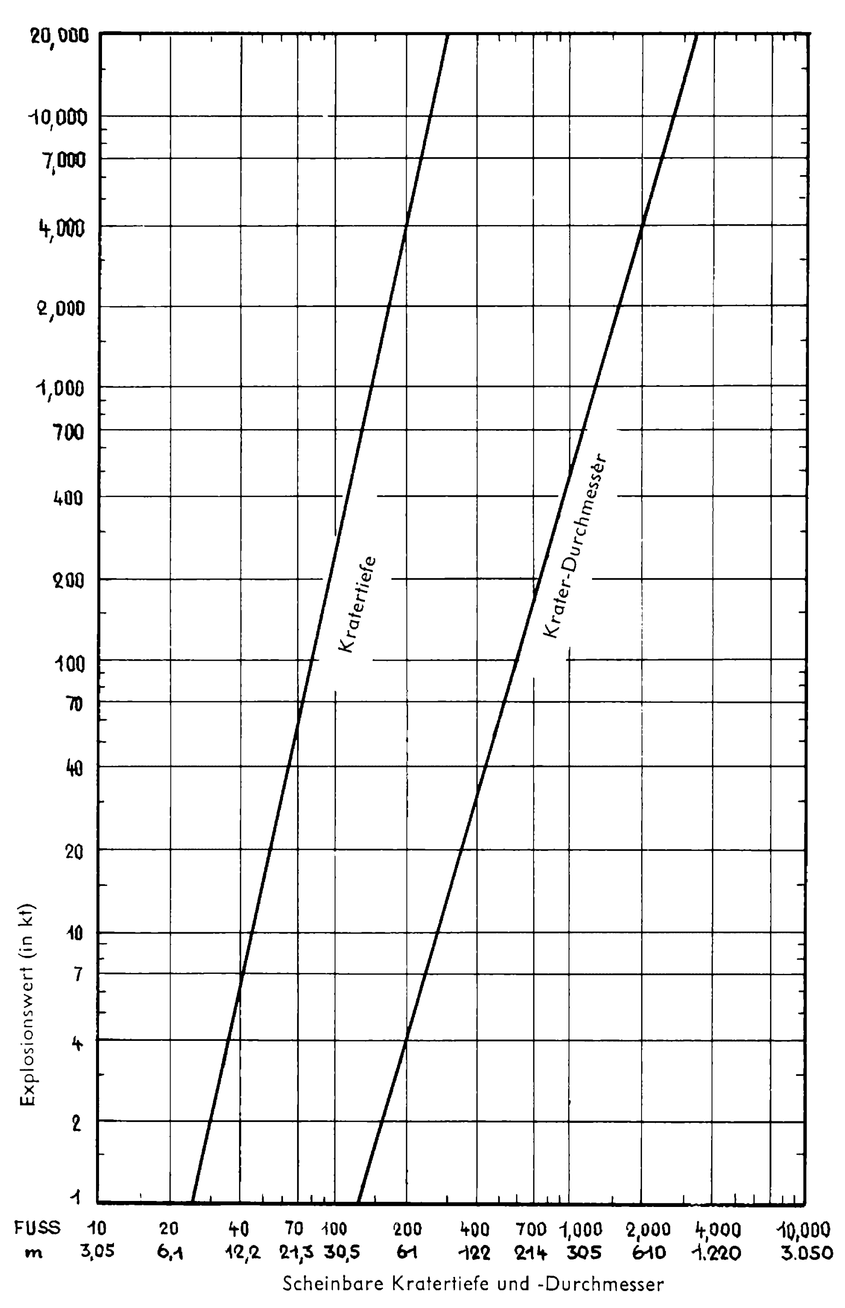


Bild 5.46 *Scheinbare Kratertiefe und Kraterdurchmesser bei Bodenexplosion in trockenem Boden*

Der gesamte Durchmesser einschließlich des Kraterwalls (D_l) beträgt etwa das Zweifache des Kraterdurchmessers; also ist

$$D_l \approx 2\,D_a\,,$$

und die Höhe des Kraterwalls (H_l) beträgt etwa ein Viertel der Kratertiefe, d. h.

$$H_l \approx 0{,}25\,H_a\,.$$

5.46 Die (scheinbare) Kratertiefe und der Kraterdurchmesser bei Bodenexplosion eines Atomsprengkörpers von W kt Explosionswert (1 kt bis 20000 kt oder 20 Mt) bei trockenem Boden ist aus Bild 5.46 ersichtlich. Den Kurvenwerten sind die in Abschn. 5.8 angegebenen Umrechnungsgesetze zugrunde gelegt, d. h. der Kraterdurchmesser wird mit $W^{1/3}$ und die Kratertiefe mit $W^{1/4}$ umgerechnet. Verschiedene Bodenmerkmale, insbesondere der Feuchtigkeitsgehalt, beeinflussen die Kratergröße. Deshalb werden annähernde »Bodenfaktoren« verwendet, um die Werte bei anderen Böden zu ermitteln, wenn die für trockenen Boden bekannt sind. Diese Faktoren sind zusammen mit einem Anwendungsbeispiel neben dem Bild 5.46 angegeben.

Kraterradius bei einer Untererdexplosion

5.47 Die Abhängigkeit des Kraterradius von der Explosionstiefe bei Untererdexplosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers in trockenem Boden ist in der Kurve in Bild 5.47 gezeigt. Um den Kraterradius bei einer Explosion von W kt in bestimmter Tiefe zu ermitteln, muß zunächst die umgerechnete Explosionstiefe ermittelt werden, indem die tatsächliche Tiefe durch $W^{1/3}$ dividiert wird. Dann wird aus Bild 5.47 der Kraterradius für diese Tiefe bei einer 1-kt-Explosion abgelesen. Durch Multiplikation des Ergebnisses mit $W^{1/3}$ wird der gewünschte Kraterradius gewonnen. Die Berichtigungsfaktoren für hartes Felsgestein und gesättigten Boden sind in dem Beispiel neben Bild 5.47 angegeben.

Die technischen Grundlagen einer Unterwasserexplosion

Die Merkmale der Stoßwelle

5.48 Durch Verbindung theoretischer Überlegungen mit Messungen, die bei Unterwasserdetonation von TNT-Ladungen durchgeführt wurden, sind einige charakteristische Merkmale des Unterwasserstoßes aus einer Kernexplosion errechnet worden. Der Spitzendruck, der Impuls je Flächeneinheit und die Energie der Stoßwelle je Flächeneinheit bei verschiedenen Entfernungen von einer tiefen

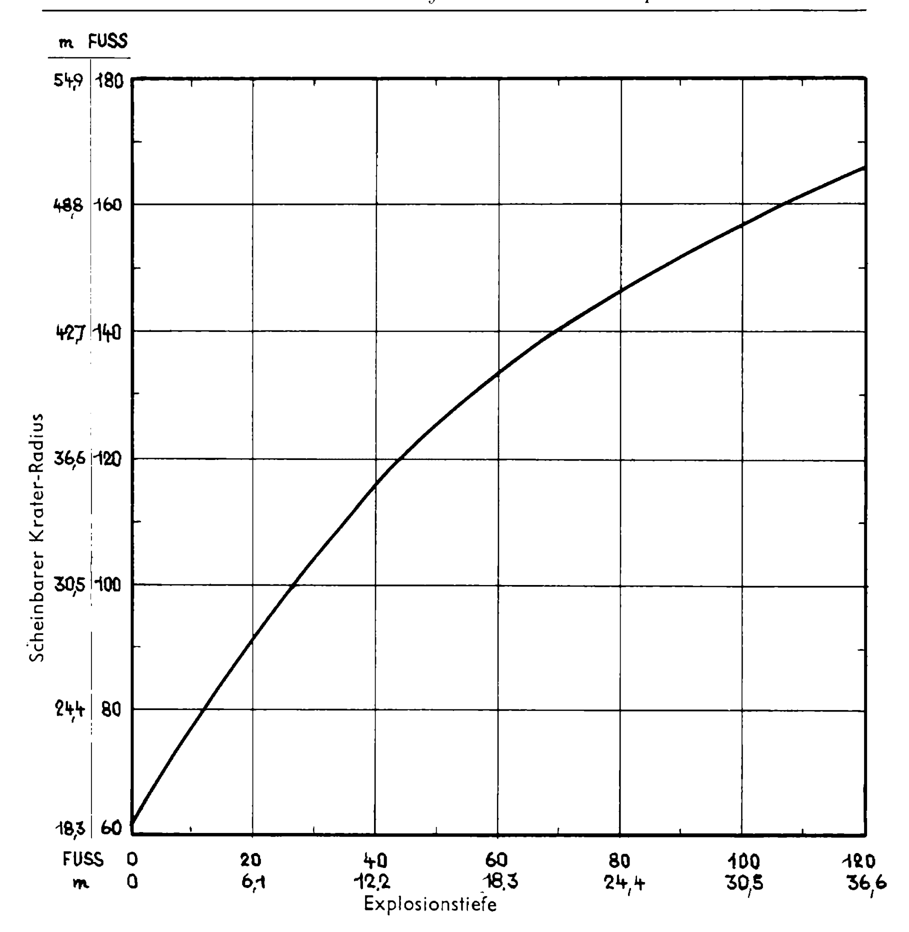


Bild 5.47 Verhältnis des scheinbaren Kraterradius zur Explosionstiefe bei einer 1-kt-Explosion in trockenem Boden

Unterwasserexplosion von 1 kt sind in Bild 5.48 dargestellt. Es ist eine Explosion in großer Tiefe in einem tiefen Gewässer angenommen worden, um die Oberflächenwirkungen auszuschalten. Deshalb sind die in Bild 5.48 angegebenen Werte für den Impuls unabhängig von der Wirkung des Druckabfalles. Bei einer Explosion und einem Ziel nahe der Wasseroberfläche würden Impuls und Energie viel geringer sein.

5.49 Die Umrechnungsverfahren zur Ermittlung der Eigenschaften der Wasserstoßwelle bei Explosion von W kt sind ähnlich wie die in Kap. III für eine Explosion in der Luft beschriebenen. Danach wird, wenn D_0 die Meßentfernung von einer 1-kt-Explosion unter Wasser ist, bei der ein bestimmter Stoßwellendruck auftritt, der gleiche Druck bei Explosion von W kt in einer Meßentfernung D erreicht, wobei

$$D = D_0 \times W^{1/3},$$

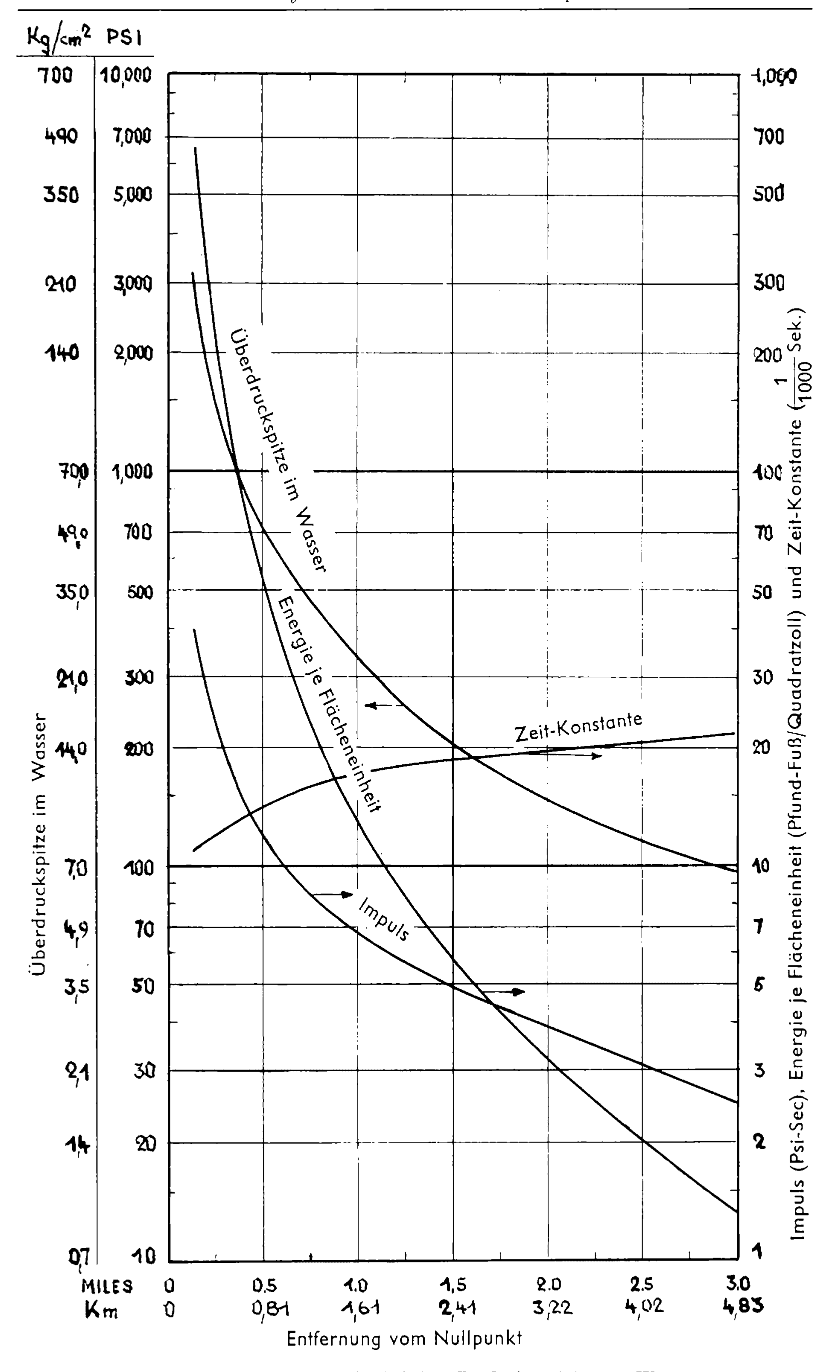


Bild 5.48 Wasserstoßwelle bei 1-kt-Explosion tief unter Wasser

ebenso wie in Gleichung 3.86.2 bei Luftexplosion. Der Unterwasserimpuls und die Energie werden in der gleichen Weise umgerechnet wie der Impuls bei einer Luftexplosion (s. Abschn. 3.88). Somit ist

$$I = I_0 \times W^{1/3} \text{ in einer Entfernung } D = D_0 \times W^{1/3},$$
$$E = E_0 \times W^{1/3} \text{ in einer Entfernung } D = D_0 \times W^{1/3},$$

wobei I und E den Impuls bzw. die Energie in einer Entfernung D von der Explosion von W kt darstellen; I_0 und E_0 sind die Werte in einer Entfernung D_0 von einer 1-kt-Explosion. Diese Umrechnungsgesetze sind im Beispiel über die Anwendung des Bildes 5.48 veranschaulicht.

Zu Bild 5.46 Die Kurven zeigen die Werte für die scheinbaren Kraterdurchmesser und Kratertiefen als Funktion des Explosionswertes bei Bodenexplosion in trockenem Boden. Die Durchschnittswerte der Bodenfaktoren, die bei der Schätzung der Kraterdimensionen in anderen Bodenarten als Multiplikatoren benutzt werden können, sind folgende:

Bodenart	Durchmesser	Tiefe
Hartes Gestein (Granit oder Sandstein)	0,8	0,8
gesättigter Boden	1,7	0,7

Beispiel:

Gegeben: Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers bei Berührung mit sandigem Lehmboden, bei dem das Grundwasser nur etwa 1 m unter der Oberfläche liegt.

Suche: die Kraterdimensionen.

Lösung: Nach Bild 5.46 betragen Kraterdurchmesser und -tiefe in trockenem Boden 104 m bzw. 16,5 m. Bei Anwendung der vorstehend für »gesättigten Boden« gegebenen Bodenfaktoren sind die geschätzten (ungefähren) Kraterdimensionen bei Bodenexplosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers auf gesättigtem Boden folgende:

Kraterdurchmesser (D_a) $= 104 \times 1{,}7 = 177$ m.

Kratertiefe (H_a) $= 16{,}5 \times 0{,}7 = 11{,}5$ m.

Durchmesser der Bruchzone $= 1{,}5\, D_a = 1{,}5 \times 177 = 265$ m.

Höhe des Kraterwalles $= 0{,}25\, H_a = 0{,}25 \times 11{,}5 = 2{,}9$ m.

Zu Bild 5.47 Die Kurve zeigt den geschätzten Kraterradius als Funktion der Durchschlagstiefe bei Explosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers in trockenem Boden. Bei anderen Bodenarten sind folgende Multiplikationsfaktoren anzuwenden:

Bodenart	relativer Kraterradius
Hartes Gestein (Granit oder Sandstein)	0,8
gesättigter Boden	1,7

Umrechnung: Zur Ermittlung des Kraterradius bei einem W-kt-Atomsprengkörper wird die tatsächliche Tiefe des Explosionszentrums durch $W^{1/3}$ dividiert. Der aus Bild 5.47 abgelesene Radius bei dieser Explosionstiefe eines 1-kt-Atomsprengkörpers wird dann mit $W^{1/3}$ multipliziert.

Beispiel:

Gegeben: Explosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers in einer Tiefe von 15 m in gesättigtem Boden.

Suche: Kraterradius.

Lösung: Die in der Skala aufgezeichnete Explosionstiefe beträgt

$$15/20^{1/3} = 15/2{,}72 = 5{,}5 \text{ m}.$$

Nach Bild 5.47 beträgt der Kraterradius bei Explosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers in dieser Tiefe 27 m. Somit beträgt der Kraterradius bei Durchschlag eines 20-kt-Atomsprengkörpers in einer Tiefe von 15 m in trockenem Boden

$$27 \times 20^{1/3} = 27 \times 2{,}72 = 73 \text{ m}.$$

Der Kraterradius in gesättigtem Boden ist dann

$$73 \times 1{,}7 = 124 \text{ m}.$$

Zu Bild 5.48 Die Kurven zeigen die Überdruckspitze, die Energie je Flächeneinheit, den Impuls je Flächeneinheit und die Zeitkonstante (definiert in Abschn. 5.50) als Funktion der Entfernung (Meßentfernung) bei Explosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers tief unter Wasser.

Umrechnung: Für Atomsprengkörper anderen Explosionswertes als 1 kt ist der Bereich, auf den sich ein gegebener Druck erstreckt, gegeben durch

$$D = D_0 \times W^{1/3};$$

hierbei ist D_0 die Entfernung von der Explosion bei 1 kt, und D ist die Entfernung von der Explosion bei W kt.

Für den Impuls, die Energie und die Zeitkonstante lauten die entsprechenden Umrechnungsgleichungen wie folgt:

$$I = I_0 \times W^{1/3} \text{ bei } D = D_0 \times W^{1/3},$$

$$E = E_0 \times W^{1/3} \text{ bei } D = D_0 \times W^{1/3}$$

und $$\Theta = \Theta_0 \times W^{1/3} \text{ bei } D = D_0 \times W^{1/3};$$

hierbei sind I_0, E_0 und Θ_0 der Impuls, die Energie und die Zeitkonstante für 1 kt bei einer Entfernung D_0.

I, E und Θ sind der Impuls, die Energie und die Zeitkonstante für W kt bei einer Entfernung D.

Beispiel:

Gegeben: ein tief unter Wasser explodierender 30-kt-Atomsprengkörper.

Suche: die Überdruckspitze, den Impuls, die Energie und die Zeitkonstante bei einer Meßentfernung von 5 km.

Lösung: Da bei 30 kt $D = 5$ km ist, beträgt die Entfernung D_0 bei 1 kt $= 5/30^{1/3} = 5/3{,}1 = 1{,}6$ km. Nach Bild 5.48 beträgt die Überdruckspitze bei 1,6 km von einer 1-kt-Explosion 23,1 kg/cm². Nach dem Umrechnungsgesetz ist der gleiche Druck in einer Entfernung von $1{,}6 \times 30^{1/3} = 5$ km von einer 30-kt-Explosion vorhanden. Also beträgt der gesuchte Wert der Überdruckspitze 23,1 kg/cm².

In einer Entfernung von 1,6 km von der 1-kt-Explosion sind Impuls, Energie und Zeitkonstante nach Bild 5.48 wie folgt:

Impuls $= 0{,}46$ kg-sec/cm²

Energie $= 0{,}27$ mkg/cm²

Zeitkonstante $= 17{,}3$ ms [1])

Danach sind die entsprechenden Werte in 5 km von der 30-kt-Explosion folgende:

Impuls $= 0{,}46 \times 30^{1/3} = 1{,}43$ kg-sec/cm²

Energie $= 0{,}27 \times 30^{1/3} = 0{,}84$ mkg/cm²

Zeitkonstante $= 17{,}5 \times 30^{1/3} = 54$ ms

5.50 Das Gesetz, nach dem der Stoßwellendruck in einer bestimmten Entfernung von der Explosion mit der Zeit nachläßt, kann dargestellt werden durch die Formel

$$p(t) = pe^{-t/\Theta} \tag{5.50.1}$$

hierbei ist $p(t)$ der Druck zur Zeit t nach Ankunft der Stoßfront an dem Beobachtungspunkt, p ist der Spitzenwert zur Zeit der Ankunft und Θ ist der Parameter, genannt die »Zeitkonstante«. Physikalisch ist Θ der Zeitpunkt, zu welchem der Druck auf p/e abgeschwächt ist. Die Zeitkonstante schwankt mit der Entfernung von der Explosion. In Bild 5.48 sind einige errechnete Werte für die Explosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers tief unter Wasser enthalten. Die Zeitkonstante für eine Explosion von W kt kann nach der oben für Energie und Impuls angegebenen Umrechnungsmethode ermittelt werden.

---

[1]) 1 ms = 1 Millisekunde = $^1/_{1000}$ Sekunde.

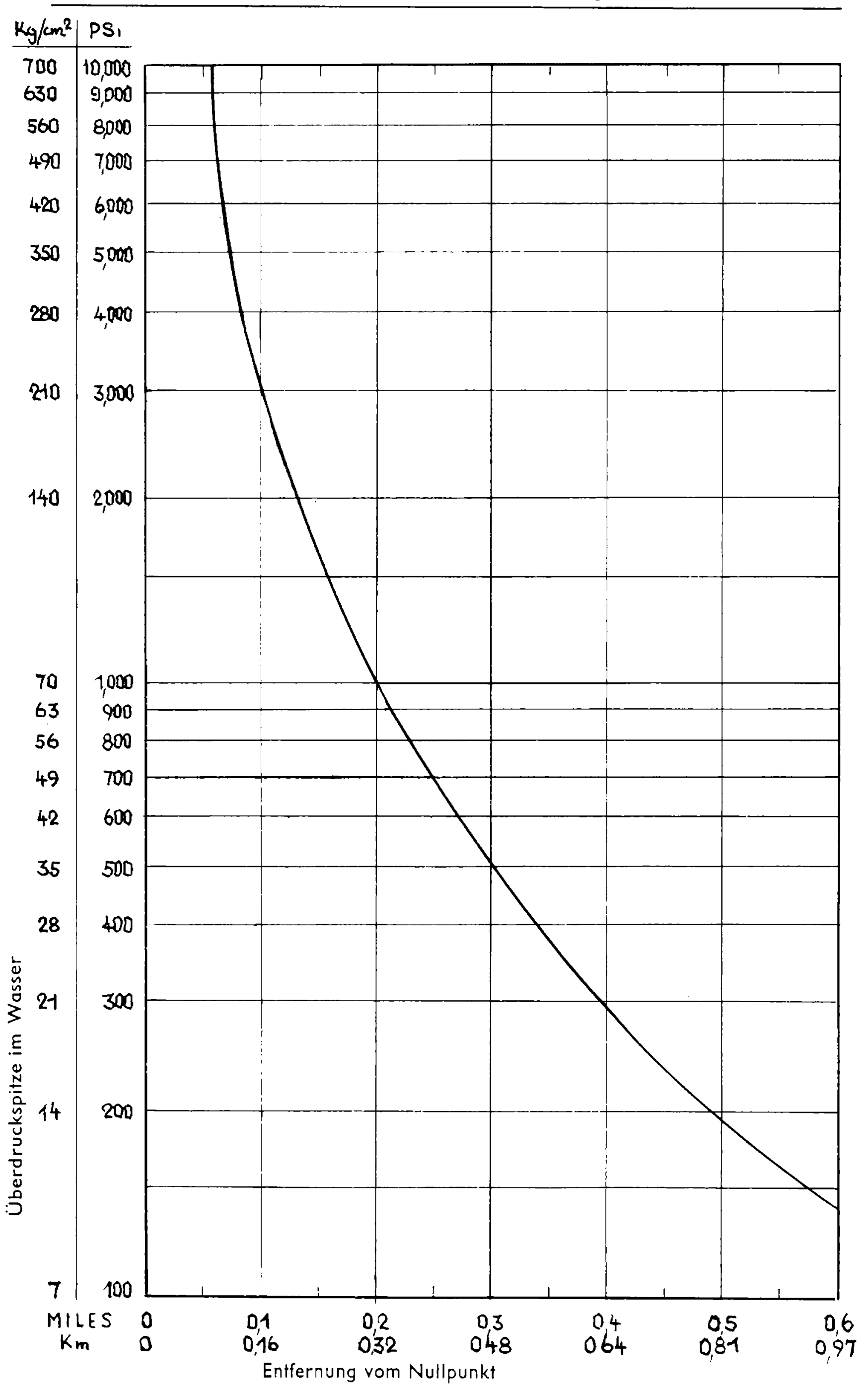


Bild 5.52 Überdruckspitze 1-kt-Explosion in mittlerer Tiefe in etwa 20 m tiefem Wasser

5.51 Aus Gleichung 5.50.1 geht hervor, daß Θ bestimmt, wie der Stoßwellendruck mit der Zeit nachläßt; damit liefert Θ eine relative Angabe der Dauer der Wasserstoßwelle. Da Θ mit zunehmender Entfernung von der Explosion ansteigt, nimmt die Dauer der Wasserstoßwelle entsprechend zu.

5.52 Die Überdruckspitze und die Dauer der Wasserstoßwelle bei einer Explosion in nicht sehr tiefem Wasser sind wegen des Einflusses der Luft und der Begrenzung durch den Grund geringer, als oben für eine Explosion in tiefem Wasser angegeben. Die Überdruckspitzen im Wasser im Verhältnis zur Entfernung vom Nullpunkt bei einer 1-kt-Explosion in mittlerer Tiefe sind entsprechend den beim *Baker*-Test in Bikini durchgeführten Messungen in Bild 5.52 aufgeführt. Die Ergebnisse gelten im allgemeinen für eine Explosion in mittlerer Tiefe in einem Gewässer von einer umgerechneten Gesamttiefe (tatsächliche Tiefe geteilt durch $W^{1/3}$) von 20 m. Die Entfernung, in welcher eine gegebene Überdruckspitze eintritt, erhält man dann durch Multiplikation mit dem üblichen Umrechnungsfaktor $W^{1/3}$.

Luftstoß aus Unterwasserexplosionen

5.53 Wie wir bereits gesehen haben, wird eine bestimmte Menge der bei einer Explosion in geringer Tiefe unter Wasser auftretenden Stoßwellenenergie als Luftstoßwelle an die Luft übertragen. Der Prozentsatz der so übertragenen Energie hängt von der Explosionstiefe ab; aber um einige Angaben über die Überdrücke in der Luft zu bringen, sind die beim *Baker*-Test in Bikini erzielten Ergebnisse als Grundlage benutzt worden. Hieraus ist mit Hilfe des bekannten Umrechnungsgesetzes $W^{1/3}$ die Kurve in Bild 5.53 für eine 1-kt-Unterwasserexplosion errechnet worden. Die in dieser Kurve aufgeführten Überdrücke sind geringer, als sie bei einer Bodenexplosion festgestellt wurden, jedoch höher als bei Explosionen in größerer Tiefe unter Wasser. Als grobe Annäherung kann diese Kurve für den Überdruck als Funktion der Entfernung mit dem bekannten Umrechnungsgesetz für Luftstoßüberdruck für alle in geringer Tiefe erfolgenden Explosionen in einem Gewässer von mittlerer Tiefe verwendet werden.

Wellenhöhe bei Unterwasserexplosionen

5.54 Durch Umrechnung der bei dem *Baker*-Test in Bikini beobachteten Wellenhöhen (Tabelle 5.40) sind die in Bild 5.54 aufgeführten Ergebnisse für die ungefähren maximalen Wellenhöhen (Wellenberg bis Wellental) bei verschiedenen Entfernungen von einer 1-kt-Unterwasserexplosion gewonnen worden. Die Ergebnisse gelten für eine Explosion von W kt in einem Gewässer, dessen umgerechnete Tiefe, die in diesem Falle die tatsächliche Tiefe geteilt durch $W^{1/4}$ ist, 26 m beträgt. Die Wellenhöhe in einer beliebig gewählten Entfernung vom Nullpunkt bei einer Explosion von W kt ermittelt man, indem man das für eine 1-kt-Explosion in Bild 5.54 auf-

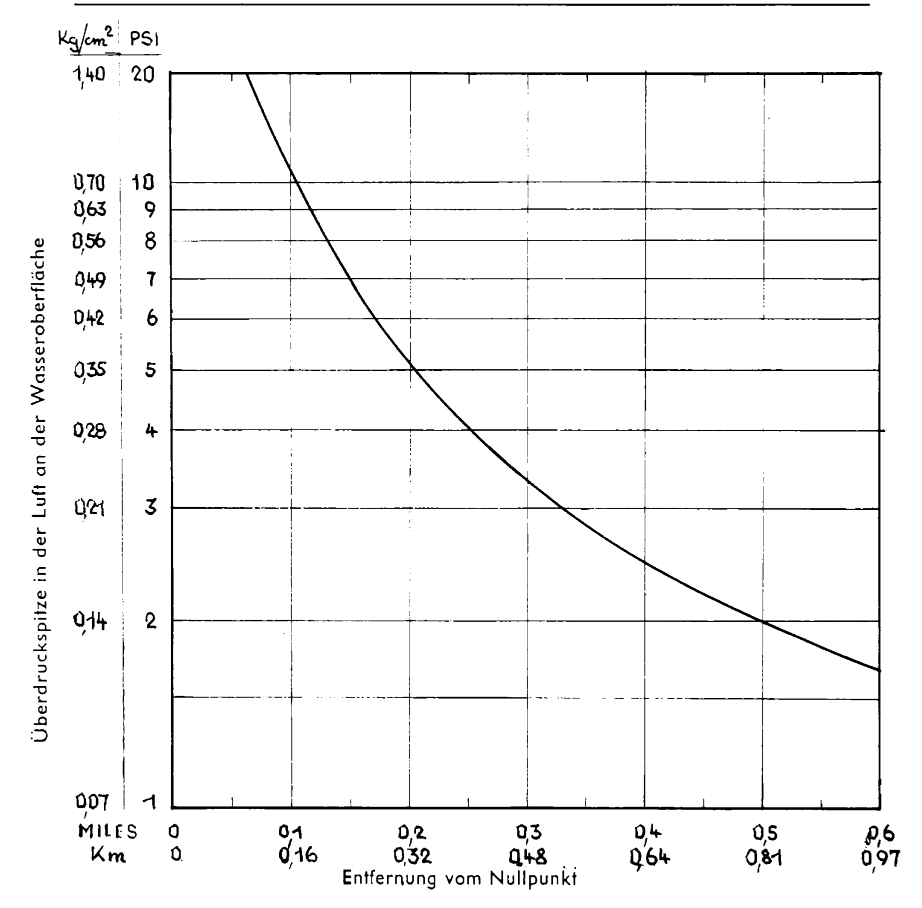


Bild 5.53 Überdruckspitze in der Luft an der Wasseroberfläche bei Explosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe unter Wasser

geführte Ergebnis mit dem Umrechnungsfaktor $W^{1/2}$ multipliziert. Beträgt die umgerechnete Wassertiefe weniger als 26 m, so verringert sich die Wellenhöhe linear mit der tatsächlichen Tiefe. Es ist zu bemerken, daß die in Bild 5.54 enthaltenen Angaben für eine gleichbleibende Wassertiefe gelten und kein Brechen berücksichtigen, das vorkommen kann, wenn die Wellen ein flaches Gewässer treffen.

Kraterbildung unter Wasser

5.55 Die Maße des auf dem Grunde des Gewässers bei einer Explosion verschiedenen Explosionswertes gebildeten Kraters sind aus den Kurven in Bild 5.55 ersichtlich. Die Werte gelten für Explosionen in einer Tiefe von weniger als 6 m in

einem 18 m tiefen Gewässer, dessen Grund aus Sand, Sand und Kies oder weichem Gestein besteht. Die Berichtigungsfaktoren für andere Bodenarten sind neben Bild 5.55 aufgeführt.

Zu Bild 5.52 Die Kurve zeigt die Abhängigkeit der Überdruckspitze im Wasser im Bereich einer 1-kt-Explosion in mittlerer Tiefe in etwa 20 m tiefem Wasser.

Umrechnung: Für eine W-kt-Explosion ermittelt man die Entfernung, in der ein gegebener Druck in umgerechneter Wassertiefe von 19,8 m auftritt, indem man die Entfernung für eine 1-kt-Explosion mit $W^{1/3}$ multipliziert.

Beispiel:

Gegeben: ein in mittlerer Tiefe in 61 m tiefem Wasser explodierender 30-kt-Atomsprengkörper.

Suche: die Entfernung, in welcher eine Überdruckspitze von 21 kg/cm² auftritt.

Lösung: Die der tatsächlichen Tiefe von 61 m entsprechende umgerechnete Tiefe beträgt $61/30^{1/3} = 61/3{,}1 = 19{,}6$ m. Diese Ziffer kommt der in dem zu verwendenden Bild 5.52 angenommenen Tiefe von 19,8 m ziemlich nahe. Nach der Kurve tritt bei einer 1-kt-Explosion ein Druck von 21 kg/cm² in einer Entfernung von 0,63 km auf. Also tritt bei einem 30-kt-Sprengkörper eine Überdruckspitze von 21 kg/cm² in einer Entfernung von

$$0{,}63 \times 30^{1/3} = 0{,}63 \times 3{,}1 = 1{,}95 \text{ km auf.}$$

Zu Bild 5.53 Die Kurve zeigt die Überdruckspitze an der Wasseroberfläche bei Explosion eines 1-kt-Atomsprengkörpers in geringer Tiefe unter Wasser als Funktion der Entfernung vom Nullpunkt.

Umrechnung: Die Entfernung, in welcher eine gegebene Überdruckspitze in der Luft bei Explosion eines W-kt-Atomsprengkörpers auftritt, ermittelt man, indem man die Entfernung für den gleichen Überdruck bei einer 1-kt-Explosion mit dem Umrechnungsfaktor $W^{1/3}$ multipliziert.

Beispiel:

Gegeben: ein in 30 m Tiefe im Wasser explodierender 30-kt-Atomsprengkörper.

Suche: die Entfernung, in welcher der Überdruck an der Wasseroberfläche 0,35 kg/cm² beträgt.

Lösung: Nach Bild 5.53 tritt bei einer 1-kt-Explosion ein Überdruck in der Luft von 0,35 kg/cm² in einer Entfernung von 0,32 km vom Nullpunkt auf. Also beträgt die Entfernung vom Nullpunkt bei einer 30-kt-Explosion bei gleichem Überdruck

$$0{,}32 \times 30^{1/3} = 1 \text{ km.}$$

Zu Bild 5.54 Die Kurve zeigt die ungefähre maximale Höhe vom Wellenberg bis Wellental im Verhältnis zur waagerechten Entfernung bei einer 1-kt-Explosion in 26 m tiefem Wasser. (Dies entspricht der umgerechneten Tiefe bei dem *Baker*-Test in Bikini.)

Umrechnung: In einer gegebenen Entfernung vom Nullpunkt beträgt die Wellenhöhe bei einer W-kt-Explosion das $W^{1/2}$fache der in dieser Entfernung bei einer 1-kt-Explosion in einem Gewässer der gleichen umgerechneten Tiefe auftretenden Wellenhöhe. Bei einer Wassertiefe von weniger als 26 $W^{1/4}$ m nimmt die Wellenhöhe linear mit der Wassertiefe ab.

Beispiel:

Gegeben: a) ein in 61 m Tiefe unter Wasser explodierender 30-kt-Atomsprengkörper;

b) ein in 30,5 m Tiefe unter Wasser explodierender 30-kt-Atomsprengkörper.

Suche: die voraussichtliche Wellenhöhe für jeden Fall in einer Entfernung von 6,4 km vom Nullpunkt.

Lösung: a) Die umgerechnete Wassertiefe beträgt

$$61/30^{1/4} = 61/2{,}34 = 26 \text{ m};$$

also ist Bild 5.54 für diesen Fall anwendbar. Nach der Kurve beträgt die maximale Wellenhöhe in einer Entfernung von 6,4 km von der 1-kt-Explosion 0,30 m. Also beträgt bei einer 30-kt-Explosion in 61 m Tiefe unter Wasser die Wellenhöhe in 6,4 km Entfernung

$$0{,}3 \times 30^{1/2} = 0{,}3 \times 5{,}5 = 1{,}65 \text{ m} \text{ vom Wellenberg bis Wellental.}$$

b) Da 30,5 m weniger ist als 26 $W^{1/4}$, wenn $W = 30$ kt ist, ist die Wellenhöhe jetzt proportional der tatsächlichen Wassertiefe. Beträgt die Tiefe 61 m, so beträgt die Wellenhöhe in einer Entfernung von 6,4 km von der 30-kt-Explosion 1,65 m. Also beträgt die Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 30,5 m in der gleichen Entfernung

$$1{,}65 \cdot \frac{30{,}5}{61} = 0{,}82 \text{ m} \text{ vom Wellenberg bis Wellental.}$$

Zu Bild 5.55 Die Kurven zeigen die Tiefe, den Durchmesser und die Randhöhe des Unterwasserkraters als Funktion des Explosionswertes. Die Ergebnisse gelten für eine Explosion in weniger als 6 m Tiefe in 18 m tiefem Wasser, dessen Grund aus Sand, Sand und Kies oder weichem Gestein besteht.

Für anderen Gewässergrund können die Kratermaße errechnet werden, indem man die in Bild 5.55 angegebenen Werte mit den folgenden Faktoren multipliziert:

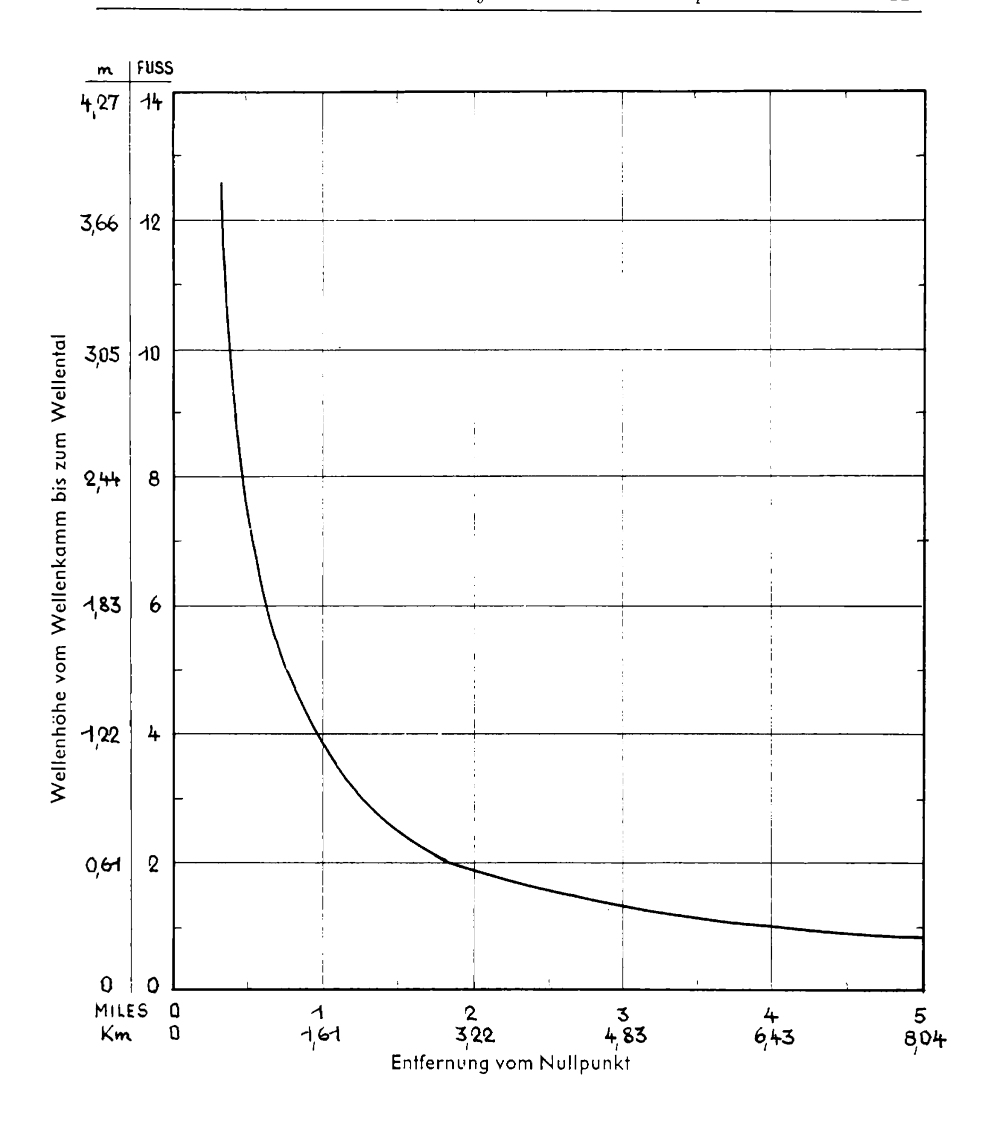


Bild 5.54 Maximale Wellenhöhe (Wellenberg bis Wellental) bei einer 1-kt-Explosion in 26 m tiefem Wasser

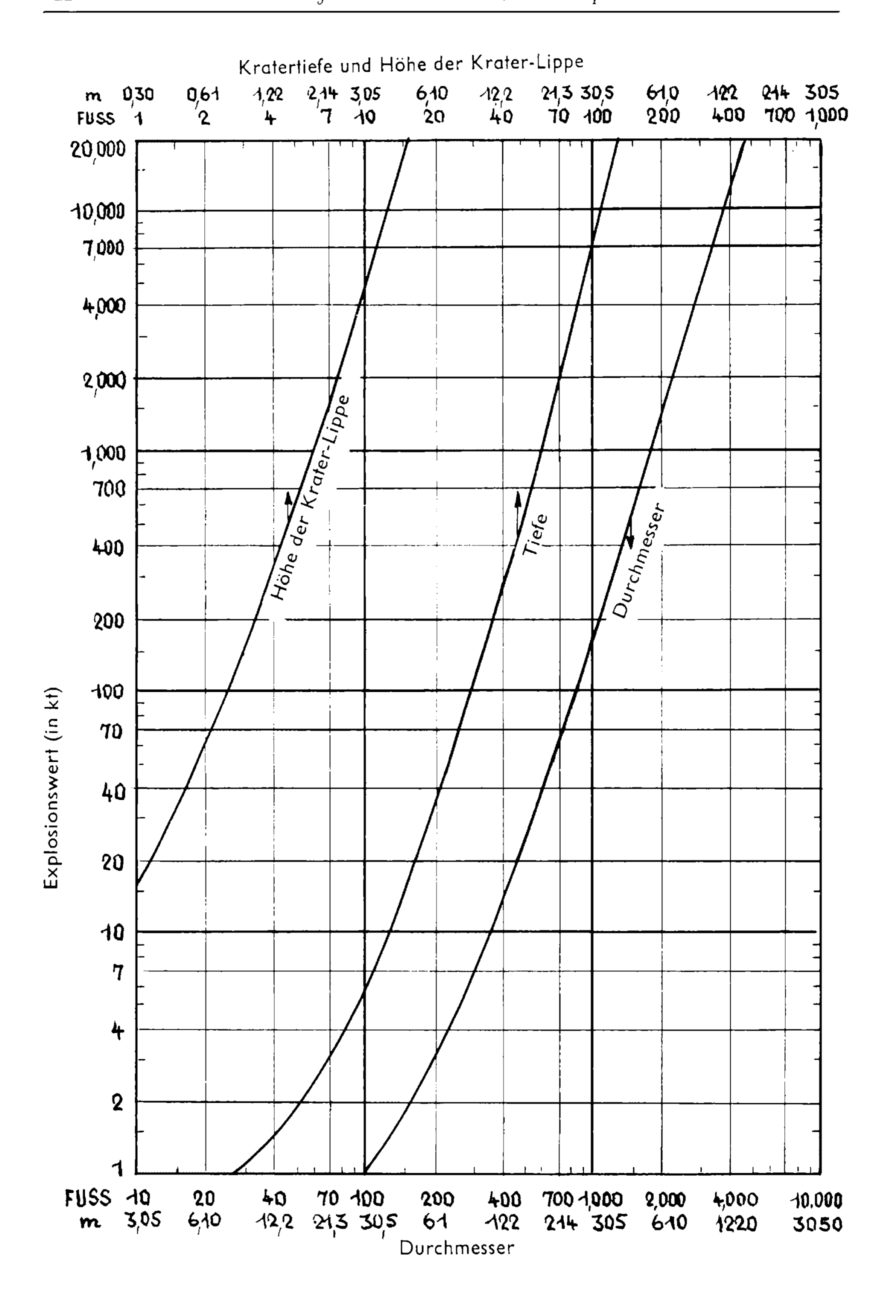


Bild 5.55 Kratermaße bei Unterwasserexplosionen

Material	Durchmesser	Tiefe	Randhöhe
Löß	1,0	1,7	0,7
Lehm	1,0	2,3	2,3
Hartes Gestein	0,7	0,5	0,4
Schlamm oder Schlick	0,7	0,4	0,2

Beispiel:

Gegeben: ein 200-kt-Atomsprengkörper, der dicht unter der Oberfläche eines 18 m tiefen Gewässers explodiert; der Grund des Gewässers besteht hauptsächlich aus Lehm.

Suche: die Kratermaße.

Lösung: Nach Bild 5.55 sind die Maße bei dieser Explosion folgende:

Durchmesser 335 m

Tiefe 11,3 m

Randhöhe 1,00 m.

Dann lauten die Maße für lehmigen Grund wie folgt:

Durchmesser $= 335 \times 1{,}0 = 335$ m

Tiefe $= 11{,}3 \times 2{,}3 = 26$ m

Randhöhe $= 1{,}0 \times 2{,}3 = 2{,}3$ m.

KAPITEL VI

Schäden durch Luftdruck, Erdstöße und Unterwasserstöße

Einleitung

6.1 In den 3 vorhergehenden Kapiteln sind die grundlegenden Erscheinungen des Luftdrucks und des Stoßes im Erdboden und im Wasser dargestellt und eine Beschreibung der durch diese Wirkungen von Kernexplosionen auf verschiedene Ziele verursachten Schäden gegeben worden. Der Zweck dieses Kapitels ist nun eine umfassende Erörterung der Schadensmerkmale und des Verhältnisses der Schäden zur Entfernung als Funktion des Explosionswertes bei einer Anzahl bestimmter Gebäudetypen. Außerdem ist die Methode einer ausführlichen Analyse der Faktoren aufgezeigt, die maßgebend sind für die Beschädigung bestimmter, der Wirkung des Luftdrucks ausgesetzter Bauwerke.

6.2 Die allgemeinen Schlußfolgerungen bezüglich der erwarteten Wirkungen von Kernexplosionen auf verschiedene Bauwerke sind in Form dreier Übersichten zusammengefaßt (Bild 6.41a, b und c). Diesen ist eine Zusammenfassung von theoretischen Berechnungen und Meßwerten aus praktischen Kernexplosionen in Japan und verschiedenen Versuchen sowie aus Laboratoriumsuntersuchungen zugrunde gelegt. Jedoch kann wegen der komplexen Natur aller Ziele, insbesondere einer Stadt, die Wirkung des Luftdrucks auf Bauwerke nicht genau vorausgesagt werden. Auch ist es nicht möglich, die Voraussage für irgendeine Situation als unbedingt zuverlässig zu bezeichnen. Trotzdem wird angenommen, daß bei richtiger Verwendung der verfügbaren Unterlagen Ergebnisse von praktischem Wert erzielt werden können. Die hier aufgeführten Schlußfolgerungen werden als die maßgebendsten für die in tatsächlichen Zielgebieten eintretenden durchschnittlichen Verhältnisse angesehen.

Schäden durch Luftdruck

Einstufung der Schäden

6.3 Bei der Beschreibung oder Einstufung der Beschädigung eines Stadtgebietes verwendet die FCDA (Federal Civil Defense Administration – Bundeszivilschutzverwaltung) ein System auf der Grundlage von 4 Schadenszonen. In der Schadenszone A werden alle Gebäude durch den Luftdruck fast völlig zerstört; in der Schadenszone B werden die meisten Gebäude so stark beschädigt, daß sie nicht mehr reparier-

bar sind; in der Schadenszone C müssen Gebäude mit mittleren Schäden während der Instandsetzung geräumt werden, und in der Schadenszone D brauchen teilweise beschädigte Gebäude während der Instandsetzung nicht geräumt zu werden. Nach diesem System werden die Schäden an Durchschnittsbauten in einer Stadt eingestuft; es ist besonders für Gesamtplanungszwecke von Wert. Da es auf Durchschnittsverhältnissen basiert, wird es nicht empfohlen für die Darstellung von Schäden an Gebäuden, die stabiler oder weniger stabil als der Durchschnitt sind. Ferner sind bestimmte Ziele, wie z. B. Flugzeuge und Schiffe, nicht für die Begriffe der Schadenszonen geeignet, wie sie für Städte festgelegt worden sind.

6.4 Um die Schäden an bestimmten Zielen zu beschreiben, ist das Durchschnittszonensystem der FCDA abgeändert worden. Wegen der Verschiedenartigkeit der Reaktion selbst von Gebäuden mit ähnlichen Merkmalen auf den Luftdruck ist die Schadenszone A bei dem einen Gebäude nicht immer die gleiche wie bei einem anderen Gebäude; dasselbe gilt für die übrigen Schadenszonen. Deshalb beziehen sich die Buchstaben A, B, C und D hier – anstatt zur Beschreibung der durchschnittlichen Schadenszonen benutzt zu werden – auf ein bestimmtes Bauwerk oder Objekt. Die Definitionen lauten dann wie folgt:

A: das Bauwerk ist praktisch völlig zerstört;

B: die Beschädigung ist so stark, daß vor Wiederbenutzung ein vollständiger Neuaufbau erforderlich ist;

C: die baulichen Schäden sind derart, daß größere Instandsetzungsarbeiten erforderlich sind, bevor das Objekt (oder Bauwerk) für seinen beabsichtigten Zweck verwendet werden kann;

D: das Objekt (oder Bauwerk) ist leicht beschädigt, so daß nur geringe behelfsmäßige (oder überhaupt keine) Instandsetzungsarbeiten erforderlich sind, um seine Benutzbarkeit aufrechtzuerhalten.

Eine ausführliche Beschreibung der Anwendung dieser Schadensklassifikation auf bestimmte Ziele ist nachstehend gegeben. Tabellen für die Bestimmung der Art des Schadens, der bei verschiedenen Bauwerken in bestimmten Entfernungen von der Explosion gegebener Explosionswerte zu erwarten ist, werden später gezeigt.

Schäden an Bauten über Erdgleiche

6.5 Die Art der Beschädigung verschiedener Bauten in der Schadenszone B, C und D ist in Tabelle 6.5a und b angegeben. Da die Schadenszone A praktisch völlige Zerstörung bedeutet, ist sie nicht mit aufgeführt. In der ersten Tabelle sind diejenigen Bauten aufgeführt, die durch die hauptsächlich während des Beugungsprozesses einwirkenden Kräfte beschädigt werden; diese Kräfte stehen in enger Beziehung zum reflektierten Druck. Die zweite Tabelle befaßt sich mit Bauten, die hauptsächlich durch den Strömungswiderstand (dynamischen Druck) beansprucht

werden. Zu bemerken ist, daß Hochbauten, wie sie in vielen Großstädten der Vereinigten Staaten üblich sind, in den Tabellen nicht erwähnt sind. Für diese Bauten liegen keine Angaben vor. In Hiroshima und Nagasaki gab es dergleichen nicht, auch sind Hochbauten noch keinen Kernexplosionsversuchen ausgesetzt worden.

Tabelle 6.5a Gebäudetypen, die hauptsächlich durch die Luftdruckwelle während des Beugungsprozesses beschädigt werden

Bauwerk	Beschädigung B	C	D
Mehrstöckiges Stahlbetongebäude[1]) mit Stahlbetonwänden, luftstoßsicher konstruiert, ohne Fenster, 3stöckig	Wände eingestürzt, Baugerippe schwer verformt, im ersten Stock Säulen eingestürzt oder nahe am Einstürzen.	Wände gerissen, Gebäude leicht verformt, Eingänge beschädigt, Türen herausgerissen oder blokkiert; etwas Beton abgeplatzt (Bild 4.82a).	Leichte Schäden verhütet.
Mehrstöckiges Stahlbetongebäude mit Betonwänden, kleiner Fensterfläche, 5stöckig	Wände eingestürzt, schwere Gerippeverformungen, beginnender Einsturz der Säulen im 1. Stock.	Außenwände schwere Risse, Innenwände schwer gerissen oder weggeblasen, Baugerippe ständige Verformung. Beton abgeplatzt.	Fenster und Türen weggeblasen, Innenwände gerissen.
Mehrstöckiges Bauwerk, wandtragende Konstruktion, Mehrfamilienhaus aus Ziegelstein, bis zu 3 Stockwerken	Tragende Wände eingestürzt, dadurch Einsturz des gesamten Bauwerks (Bild 4.89a).	Außenwände schwere Risse, Innenwände schwer gerissen oder weggeblasen.	Fenster und Türen weggeblasen, Innenwände gerissen.
Mehrstöckiges Gebäude, wandtragende Konstruktion, massive Bauart, 4stöckig. Geräumiger Bau (60 × 60 m Grundrißfläche). In diesem Falle wird die dem Luftstoß zugewandte Seite schwer beschädigt, während das Innere verhältnis mäßig unbeschädigt bleibt.	Tragende Wände stürzen ein, dadurch Einsturz des von diesen Wänden gestützten Bauwerks. Einige tragende Wände mögen durch Zwischenwände ausreichend abgeschirmt sein, so daß ein Teil des Bauwerks vielleicht nur mittlere Schäden davonträgt (Bild 4.89b).	Auf der dem Luftstoß zugekehrten Seite der Außenwände schwere Risse, an inneren Zwischenwänden schwere Risse, obwohl am weiter entfernten Ende des Gebäudes die Schäden geringer sein mögen.	Fenster und Türen weggeblasen, Risse an inneren Zwischenwänden.
Holzfachwerkbauten, Wohnhaustyp, 1- bis 2-stöckig.	Gerippe zerschlagen, so daß der größte Teil des Bauwerks einstürzt (Bild 4.14).	Wandfachwerk gerissen, Dach schwer beschädigt, innere Zwischenwände weggeblasen (Bild 4.8).	Fenster und Türen weggeblasen, innere Zwischenwände Risse (Bild 4.16).
Öltanks (43000 bis 143000 hl) kegelförmiger Deckel; es wird angenommen, daß die Tanks voll sind (sie sind empfindlicher, wenn sie leer sind). Tanks mit schwimmenden Oberabdeckungen sind weniger empfindlich.	Schwere Verformungen an den Seiten, Fugen aufgerissen, so daß der Inhalt größtenteils verlorengeht (Bild 4.74a).	Deckel eingestürzt, Seiten über der Flüssigkeit ausgeknickt, einige Verformungen unter dem Flüssigkeitsniveau.	Deckel schwer beschädigt (Bild 4.74b).

[1]) Konstruiert für einen Widerstand gegen 1,4 kg/cm² Überdruck im Machschen Bereich bei einer 20-kt-Waffe ohne Beschädigung der Einrichtung.

Tabelle 6.5b Bauwerke, die hauptsächlich durch den Winddruck beschädigt werden

Bauwerk	Beschädigung B	C	D
Industriebauten, leichte Stahlgerippe, einstöckig, mit bis zu 5 t Krantragfähigkeit. Die leichten Wände mit geringer Festigkeit stürzen rasch ein.	Schwere Gerippeverformungen. Durchbiegung der Stützen in halber Höhe. (Bild 4.55a und b).	Einige Gerippeverformungen: Kräne können nicht eingesetzt werden, bis Reparaturen ausgeführt sind (Bild 4.62b).	Fenster und Türen weggeblasen, die leichten Seiten aufgerissen oder ausgeknickt.
Industriebauten, mittlere Stahlgerippe, einstöckig, mit 20 t Krantragfähigkeit. Die leichten Wände mit geringer Festigkeit stürzen rasch ein.	Schwere Gerippeverformungen. Durchbiegung der Stützen in halber Höhe.	Einige Gerippeverformungen; Kräne können nicht eingesetzt werden, bis Reparaturen ausgeführt sind.	Fenster und Türen weggeblasen, die leichten Seiten aufgerissen oder ausgeknickt.
Industriebauten, schwere Stahlgerippe, einstöckig, mit 50 t Krantragfähigkeit. Die leichten Wände mit geringer Festigkeit stürzen rasch ein.	Schwere Gerippeverformungen. Durchbiegung der Stützen in halber Höhe.	Einige Gerippeverformungen; Kräne können nicht arbeiten, bis Reparaturen ausgeführt sind.	Fenster und Türen weggeblasen, die leichten Seiten aufgerissen oder ausgeknickt.
Bürogebäude, Stahlgerippe, 5stöckig. Die leichten Wände mit geringer Festigkeit stürzen rasch ein.	Schwere Gerippeverformungen. Beginnender Einsturz der unteren Deckenstützen.	Mittlere Gerippeverformungen. Innere Zwischenwände weggeblasen.	Fenster und Türen weggeblasen, leichte Seiten aufgerissen, innere Zwischenwände gerissen oder ausgeknickt.
Bürogebäude, Stahlbetongerippe, 5stöckig. Die leichten Wände von geringer Festigkeit stürzen rasch ein.	Schwere Gerippeverformungen. Beginnender Einsturz der unteren Deckenstützen (Bild 4.82b).	Mittlere Gerippeverformungen. Innere Zwischenwände weggeblasen. Etwas Absplittern von Beton (Bild 4.85b).	Fenster und Türen weggeblasen, leichte Seiten aufgerissen, innere Zwischenwände gerissen oder ausgeknickt.
Straßen- und Eisenbahn-Fachwerkbrücken.	Völlige Zerstörung der seitlichen Aussteifungen. Einsturz der Brücke.	Zerstörung einiger seitlicher Absteifungen, so daß die Belastungsgrenze der Brücke um etwa 50% verringert wird.	Belastungsfähigkeit der Brücke unverändert. Lediglich stärkere Verformung der seitlichen Versteifungen.

6.6 Bei bestimmten Bauelementen mit kurzer Eigenschwingungsdauer (bis zu etwa 0,05 Sekunden) und geringer plastischer Verformung beim Einsturz können die Einsturzbedingungen als Überdruckspitze ohne Berücksichtigung der Dauer der Luftdruckwelle ausgedrückt werden. In Tabelle 6.6 sind die Einsturzbedingungen für derartige Bauteile gegeben. Einige dieser Bauelemente versagen, indem sie in Stücke zerbrechen; deshalb ist der Unterschied zwischen den Drücken, die keinen Schaden verursachen, und solchen, die völlige Zerstörung verursachen, nur gering. Andere Bauelemente versagen, indem sie zuerst etwas nachgeben, aber immer noch ist der Unterschied zwischen den Drücken, die leichte Schäden verursachen, und denen, die vollständige Zerstörung verursachen, gering. Bei Wandteilen, die dem Nullpunkt zugewandt sind, sind die Drücke einfallende Luftstoßüberdrücke. Bei Wandteilen, die so ausgerichtet sind, daß auf sie keine reflektierten Drücke einwirken, müssen die einfallenden Drücke verdoppelt werden.

Tabelle 6.6 Einsturzbedingungen für Bauteile, die gegen Überdruckspitzen empfindlich sind

Bauteil	Zerstörung	Ungefährer einfallender Luftstoßüberdruck kg/cm²
Fensterscheiben, große und kleine	für gewöhnlich Zersplittern, gelegentlich auch Zerstörung des Rahmens	0,035–0,07
Gewellte Asbestwände	Zersplittern	0,07–0,14
Wellblech- oder Aluminium-Wandteile	Versagen der Verbindungen, danach Ausknicken	0,07–0,14
Wandteile aus Ziegelstein, 20–30 cm dick, nicht bewehrt	Versagen durch Abscheren und Durchbiegen	0,49–0,56
Hölzerne Seitenwandteile, Standard-Hauskonstruktion	Im allgemeinen erfolgt ein Versagen an den Hauptverbindungen, wodurch ein ganzes Wandteil weggeblasen werden kann	0,07–0,14
Beton- oder Schlackenstein-Wandteile, 20–30 cm dick, nicht bewehrt	Zersplittern der Wand	0,14–0,21

Schäden an mit Erde abgedeckten unterirdischen Leichtbauwerken

6.7 Der Luftstoß ist die bestimmende Größe für die Beschädigung von mit Erde abgedeckten, in geringer Tiefe unter Erdgleiche liegenden Bauwerken. Die Erdabdeckung verschafft Bauwerken über der Erdoberfläche einen bedeutenden Schutz gegen Luftstoß und auch einigen Schutz gegen herumfliegende Teile. Die Dicke der Erdabdeckung über dem Bauwerk würde für gewöhnlich durch den erforderlichen Schutzgrad gegen Kernstrahlung bei zulässigem Überdruck oder dynamischem Druck bestimmt werden (s. Kap. VIII).

6.8 Die übliche Methode der Erdabdeckung von Bauwerken über der Erdoberfläche oder »Unterschlupf«-Bauwerken besteht darin, eine Erdüberschüttung über dem Teil des Bauwerks anzulegen, der oberhalb der normalen Erdgleiche liegt. Die Erdüberschüttung reduziert den Luftstoßreflexions-Faktor (s. Bild 6.82a) und verbessert die aerodynamische Form des Bauwerks. Dadurch ergibt sich eine beträchtliche Verringerung der einwirkenden Übertragungskräfte. Ein weiterer Vorteil der Erdabdeckung ist die Verstärkung oder der Verschiebewiderstand, den die Erde elastischen Bauwerken durch die stützende Wirkung des Erdbodens verschafft.

6.9 Leichte, in geringer Tiefe unter Erdgleiche liegende Bauwerke sind solche, die tief genug angelegt sind, damit der obere Teil der Erdüberdeckung mit dem ursprünglichen Erdbodenniveau abschneidet. Diese Tiefe reicht jedoch nicht aus, um das

Verhältnis der Spannweite zur Dicke der Erdabdeckung so zu gestalten, daß aus der Gewölbewirkung des Bodens Nutzen gezogen werden kann (s. Abschn. 6.11). Bei einer Abdeckungsdicke bis zu etwa 3 m wird bei den meisten Bodenarten der auf die Deckenfläche eines in geringer Tiefe unter Erdgleiche liegenden Bauwerks wirkende Luftstoßdruck nur wenig abgeschwächt. Die Ergebnisse der in Nevada durchgeführten Versuche in natürlichem Maßstab zeigen, daß durch die Reflexion des Erdstoßes in dem Abschnitt zwischen der Erde und der Decke des Bauwerks offenbar kein Ansteigen des auf das Gebäude einwirkenden Druckes erfolgt.

6.10 Es ist festgestellt worden, daß die auf die senkrechten Seiten eines unter Erdgleiche liegenden Bauwerks einwirkenden seitlichen Drücke bei trockenen, gut zusammengedrückten, sandigen Böden nur 15% des auf die Decke einwirkenden Druckes betragen. Bei den meisten Bodenarten ist dieser seitliche Druck jedoch wahrscheinlich etwas höher; er kann bei porösem, gesättigten Boden bis zu annähernd 100% des auf die Decke einwirkenden Druckes betragen. Die Drücke auf die Sohle eines unter Erdgleiche liegenden Bauwerks, bei welchem die Sohlenplatte fest mit den Wänden verbunden ist, können 75 bis 100% des auf die Decke einwirkenden Druckes betragen.

6.11 Unterirdische Bauwerke, die so tief unter Erdgleiche liegen, daß die Tiefe unter Erdgleiche fast gleich oder größer als die Spannweite ist, werden durch die Gewölbewirkung des das Bauwerk umgebenden Bodens etwas begünstigt. Begrenzte Erfahrungen auf dem Versuchsgelände von Nevada haben gezeigt, daß die Gewölbewirkung des Bodens die Belastung auf elastische Bauwerke wesentlich reduziert, obwohl das genaue Ausmaß dieser Reduzierung zur Zeit nicht genau bekannt ist.

6.12 Die Beschädigung eines in geringer Tiefe unter Erdgleiche liegenden Bauwerks hängt ab von einer Anzahl von Variablen einschließlich der baulichen Merkmale, der Bodenart, der Tiefe unter Erdgleiche und des nach unten wirkenden Druckes, d. h. der Überdruckspitze der Luftstoßwelle. In Tabelle 6.12 sind die Grenzwerte der Überdruckspitze angegeben, der für verschiedene Schadensgrade zweier mit Erde abgedeckter Bauwerke erforderlich ist. Der Druckbereich soll Unterschiede in den baulichen Konstruktionen, den Bodenverhältnissen, der Form des Erdaufwurfs und der Orientierung zur einfallenden Luftstoßwelle berücksichtigen. Das Verhältnis des Schadens zur Entfernung ist für diese Gebäudetypen in Bild 6.41a angegeben.

Tabelle 6.12 Schadensmerkmale bei in geringer Tiefe unter Erdgleiche liegenden oder mit Erde abgedeckten, über der Erdoberfläche liegenden Bauwerken

Gebäudetyp	Schadens-grad	Spitzenüberdruck kg/cm²	Art des Schadens
Leichte, gewölbeförmige Wellblechbauten über der Erdoberfläche, Wellblech Stärke 10	A B	2,45–2,8 kg/cm² 2,1 –2,45 kg/cm²	vollständiger Einsturz Einsturz des Gewölbeteiles, der dem Luftstoß zugewandt ist

Gebäudetyp	Schadens-grad	Spitzenüberdruck kg/cm²	Art des Schadens
mit Spannweite von 6–7,5 m mit etwa 90 cm Erdabdeckung über dem Gewölbescheitel	C	1,4 –1,75 kg/cm²	Verformung der Stirnwände und des Gewölbes, möglicherweise Beschädigung der Eingangstür
	D	0,7 –1,05 kg/cm²	Möglicherweise Schaden an dem Belüftungssystem und der Eingangstür
Leichte Stahlbeton-Schutzbauten über oder unter Erdgleiche mit mindestens 90 cm Erdabdeckung. (Wandteile 5,1–7,6 cm dick, mit Balken, die auf 1,22 m Achsen gelagert sind)	A	2,1 –2,45 kg/cm²	Einsturz
	B	1,75–2,1 kg/cm²	teilweiser Einsturz
	C	1,05–1,75 kg/cm²	Verformung, schwere Risse und Abplatzen der Wandteile
	D	0,7 –1,05 kg/cm²	Risse in den Wandteilen, evtl. Beschädigung der Eingangstür

6.13 Eine Illustration des Schadensgrades B an einem gewölbeförmigen, mit Erde abgedeckten, über Erdgleiche liegenden Bauwerk aus Wellblech Stärke 10 ist in Bild 6.13 gezeigt. Es ist festzustellen, daß etwa die Hälfte des Gewölbes eingestürzt ist. Dieses Versagen war hauptsächlich dem dynamischen Druck zuzuschreiben, der auf den vorderen Abhang des Erdaufwurfs einwirkte.

6.14 Die Überdruckspitze bei dem völligen Einsturz des gewölbten Wellblech-Bauwerks mit etwa 90 cm Erdabdeckung ist in Tabelle 6.12 mit 2,45–2,8 kg/cm² angegeben. Es ist jedoch errechnet worden, daß – hätte dieses Bauwerk völlig unter Erdgleiche gelegen, so daß keine Erdabdeckung erforderlich gewesen wäre – ein Überdruck von 2,8–3,5 kg/cm² nötig gewesen wäre, um das Bauwerk einstürzen zu lassen. Diese Erhöhung des erforderlichen Überdrucks ist der Tatsache zuzuschreiben, daß der dynamische Druck unter diesen Verhältnissen auf das Mindestmaß reduziert wird. Zu erwähnen ist, daß es bei Anwendung normaler Konstruktionsmethoden möglich ist, unterirdische Bauwerke zu konstruieren, die Luftstoßüberdrücken von mehr als 7 kg/cm² an der Erdoberfläche aushalten (s. Kap. XII).

Schäden an Landfahrzeugen

6.15 Die hier in Betracht gezogenen Arten von Landfahrzeugen schließen private Fahrzeuge mit Motorantrieb (Autos, Lastwagen) sowie Fahrzeuge für Erdarbeiten (Planierraupen, Löffelbagger [Schrapper]) und Eisenbahnbetriebsfahrzeuge (Lokomotiven, geschlossene und offene Güterwagen, Tankwagen) ein. Diese Fahrzeuge sind vor allem gegen den Luftwiderstand (Winddruck) empfindlich, d. h. sie reagieren hauptsächlich auf den dynamischen Druck und weniger auf den Luftstoß-

überdruck. In Tabelle 6.15 sind die verschiedenen Schadensgrade beschrieben. Die entsprechenden Bereiche als Funktion des Explosionswertes sind in einer Übersicht in Bild 6.41 c angegeben. Bei den privaten Motorfahrzeugen gelten die angegebenen Bereiche besonders für schwere Lastwagen. Für Personenfahrzeuge und leichte Lastwagen würden die jeweiligen Entfernungen etwas größer sein, wogegen sie bei schweren Fahrzeugen für Bau- und Erdarbeiten kleiner sein würden, als auf der Übersicht angegeben.

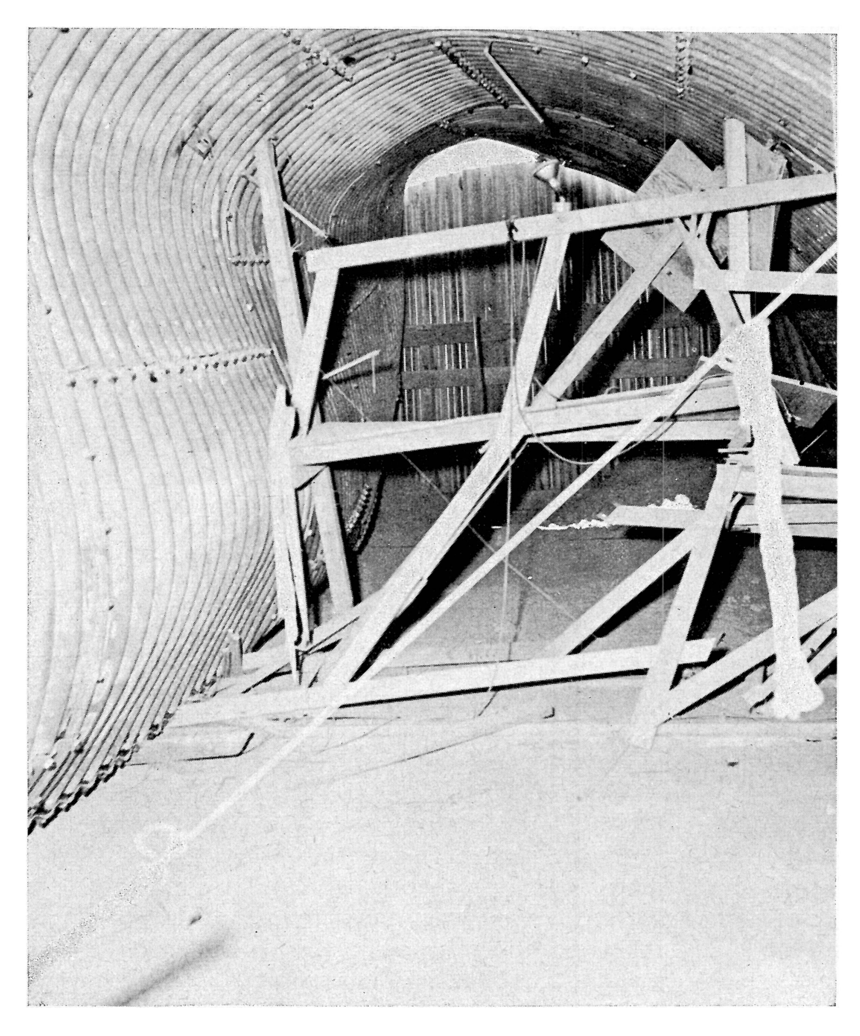


Bild 6.13 Schadensgrad B an einem mit Erde abgedeckten Bauwerk aus Wellblech Stärke 10 (3,3 mm)

Tabelle 6.15 Schadensmerkmale bei Landfahrzeugen

Art des Fahrzeugs	Schadens-grad	Art des Schadens
Zivile Motorfahrzeuge (Autos, Lastwagen, Planiermaschinen)	A	Vollständig zerstört, Teile verstreut
	B	Große Versetzungen, äußeres Zubehör (Türen und Hauben) weggerissen; Erneuerung vor Gebrauch notwendig
	C	Umgekippt und versetzt, stark eingebeult, Rahmen gesprungen, größere Reparaturen notwendig
	D	Scheiben zerbrochen, Beulen in der Karosserie, evtl. umgekippt, unmittelbar zu verwenden
Eisenbahnbetriebs-fahrzeuge (geschlossene und offene Wagen, Tankwagen)	A	Vollständig zerstört, Teile verstreut
	B	Wagen von den Schienen geworfen und schwer beschädigt, einzelne Teile brauchbar
	C	Türen zerstört, Wagenaufbau beschädigt, kann zum Ausbesserungsschuppen rollen (Bild 4.97a)
	D	Einiger Türen- und Aufbauschaden; Wagen kann weiterhin verwendet werden
Lokomotiven (Diesel- oder Dampf-)	A	Verzerrt und allgemein zerstört
	B	Umgekippt, Teile weggeblasen, zersprungen oder verdreht, so daß größere Überholung erforderlich
	C	Wahrscheinlich umgekippt, kann nach Aufrichten und notwendigen größeren Reparaturen zum Ausbesserungsschuppen gezogen werden
	D	Scheiben zerbrochen und geringfügige Schäden an Einzelteilen, unmittelbar zu verwenden

Schäden an abgestellten Transportflugzeugen

6.16 Flugzeuge sind verhältnismäßig empfindlich gegen die Wirkungen des Luftstoßes, und wie in Kap. IV gesagt, ist die Überdruckspitze der geltende Parameter für die Berechnung des Schadens. Die durch Überdrücke von 0,07–0,14 kg/cm² entwickelten Kräfte reichen aus, um Verkleidungen einzudrücken und Versteifungen und Holme zu verziehen. Bei höheren Überdrücken entwickelt die Material-(oder Luft-)Geschwindigkeit hinter der Stoßfront Strömungswiderstände, die imstande sind, ein abgestelltes Flugzeug zu drehen, zu versetzen, umzukippen oder hochzuheben, so daß dann ein Schaden aus dem Zusammenstoß mit anderen Flugzeugen oder Bauwerken oder dem Erdboden entstehen kann. Flugzeuge sind auch sehr empfindlich gegen Schäden aus herumfliegenden Bruchstücken, die durch die Luftdruckwelle fortgetragen werden.

6.17 Mehrere Faktoren beeinflussen den Schadensgrad, der an einem Flugzeug von gegebenem Typ in einem bestimmten Entfernungsbereich von einer Kernexplosion zu erwarten ist. Flugzeuge, die so abgestellt sind, daß sie mit der Stirnseite in Richtung des Luftstoßes weisen, werden weniger Schaden erleiden als solche, die mit dem Heck oder einer Seite der ankommenden Luftdruckwelle zugewandt sind. Die Abschirmung eines Flugzeuges durch ein anderes oder durch Bauwerke oder die Geländeform kann die Beschädigung verringern, insbesondere die Beschädigung durch herumfliegende Bruchstücke. Die normale Verankerung von Flugzeugen, wie sie erfolgt, wenn starker Wind zu erwarten ist, wird ebenfalls das Ausmaß des Schadens in den Entfernungsbereichen, bei denen sonst eine Zerstörung eintritt, verringern.

6.18 Die verschiedenen Schadenskategorien an Flugzeugen sind in Tabelle 6.18 zusammen mit den ungefähren Überdrücken dargestellt, bei denen diese Schäden zu erwarten sind. Die entsprechenden Schadensbereiche im Verhältnis zur Energie der Kernexplosion werden später angegeben (Bild 6.41 a). Sie gelten für Transportflugzeuge und Verkehrsflugzeuge, die im Freien in beliebiger Richtung zum Explosionspunkt abgestellt sind. Zu bemerken ist, daß diesen Schadensbereichen Versuche zugrunde liegen, bei welchen Militärflugzeuge Explosionen im Kilotonnenbereich ausgesetzt wurden. Bei Explosionen im Megatonnenbereich kann die längere Dauer der Luftstoßeinwirkung die Ergebnisse beeinflussen. Da jedoch keine Unterlagen über derartige Wirkungen vorliegen, ist nicht versucht worden, die Schadensbereiche zu korrigieren.

Tabelle 6.18 Schadensmerkmale bei abgestellten Flugzeugen

Schadensgrad	Art des Schadens	Überdruck atü
A	Vollständige Zerstörung	0,42
B	Schäden, deren Reparatur unwirtschaftlich wäre	0,28
C	Größere Reparaturen in der Halle vor weiterer Flugverwendung (Bild 4.100 a und b)	0,21
D	Geringere oder keine Reparatur und Ersatz vor weiterer Flugverwendung erforderlich	0,07

6.19 Flugzeuge mit stoffbespanntem Steuer oder anderem brennbaren Material können unter bestimmten Umständen bei Entfernungen, die größer sind als die, bei denen ein gleichartiger Schaden durch die Luftstoßwirkungen entstehen würde, durch die thermische Strahlung beschädigt werden (s. Bild 6.41 c). Die Empfindlichkeit gegen thermische Strahlung kann verringert werden, indem brennbare Materialien vor der Einwirkung direkter Strahlung geschützt werden oder indem sie mit (hellfarbigen) Schutzanstrichen versehen werden, die den größten Teil der thermischen Strahlen mehr reflektieren als absorbieren (s. Kap. VII).

Schäden an Schiffen

6.20 Die Beschädigung von Schiffen durch eine Explosion in der Luft oder an der Wasseroberfläche erfolgt hauptsächlich durch den Luftdruck, da durch das Wasser nur wenig Druck übertragen wird. Aus diesem Grunde wird der über dem Wasserspiegel liegende, exponierte Teil des Schiffes den größten Schaden davontragen. Eine kurze Schilderung der bei dem ABLE-Versuch in Bikini gemachten Beobachtungen war in Kap. IV gegeben, und die Schlußfolgerungen können hier zusammengefaßt werden. Die Masten, Holme, Radarantennen, Schornsteine, elektrische Anlagen und andere leichte Objekte sind gegen Luftstoß besonders empfindlich. Die Schiffsmaschinen würden wahrscheinlich in dem Bereich, innerhalb dessen das Schiff die Explosionswirkungen überdauert, intakt bleiben. Die Kessel und »Füchse« sind hiervon ausgenommen, und ein Luftdruckschaden hieran wird in vielen Fällen die Ursache für die Fahruntüchtigkeit eines Schiffes sein.

6.21 Der Schadensgrad an Handelsschiffen ist in Tabelle 6.21 geschildert. Hier sind die Gruppen A und B zusammengefaßt, weil es schwierig ist, sie klar zu unterscheiden. Das Verhältnis des Schadens zur Entfernung ist für verschiedene Arten von Schäden in Bild 6.41a angegeben. Illustrationen der an Schiffen durch Luftstoß aus einer Kernexplosion verursachten Schäden waren in Kap. IV gegeben.

Tabelle 6.21 Die Schadensmerkmale an Schiffen bei einem Luftstoß

Schadensgrad	Art des Schadens
A und B	Schwere Beschädigung, wahrscheinlich Untergang des Schiffes. (Schiff sinkt oder wird soweit beschädigt, daß Neuaufbau erforderlich wird)
C	Mittlere Schäden, Fahruntüchtigkeit. (Schiff erfordert umfangreiche Instandsetzungsarbeiten, insbesondere an den stoßempfindlichen Zubehörteilen oder deren Fundamenten, z. B. an den Antriebsmaschinen, den Kesseln und der Inneneinrichtung)
D	Leichte Schäden. (Schiff wird noch betriebsfähig sein, obwohl Schäden an den Schaltanlagen, elektrischen und Maschinenanlagen vorhanden sind)

Schäden an öffentlichen Versorgungseinrichtungen

6.22 Die hier gemachten Angaben gelten für Schäden, die an Stromversorgungsleitungen, Telefon- und Telegrafenleitungen über der Erdoberfläche und an Sendetürmen verursacht werden. Unterirdische Rohrleitungen sind weiter unten erörtert (Abschn. 6.31). Angaben über Schäden an Bauwerken, wie Kraftwerken, Pumpstationen und Sammelbehältern können aus Abschn. 6.5ff entnommen werden, in denen Bauwerke über Erdgleiche behandelt sind. Stromleitungen werden vor allem dann beschädigt, wenn Masten (einige oder alle) umgeblasen werden, sonst aber

bleiben sie unbeschädigt. Leitungen, die radial zur Richtung der Ausbreitung der Luftdruckwelle verlaufen, sind weniger gefährdet als solche, die in Querrichtung verlaufen. Die Ergebnisse können interpoliert werden, um das Verhältnis des Schadens zur Entfernung bei Leitungen zu ermitteln, die in Zwischenrichtung verlaufen. Der Schadensgrad A bei Versorgungsleitungen bedeutet, daß die meisten Masten umgeblasen und die Drähte gerissen sind (s. Bild 4.111). Die Schadensgrade B, C oder D treten im allgemeinen nicht auf, da außerhalb der Schadenszone *A* nur leichte Schäden zu erwarten sind, die schnell repariert werden können.

6.23 Für Rundfunk- und Fernsehsendetürme von 60–150 m Höhe sind in Tabelle 6.23 die verschiedenen Arten der Beschädigung beschrieben. Die entsprechenden Bereiche als Funktion des Explosionswertes sind in Bild 6.41 c gegeben.

Tabelle 6.23 Schadensmerkmale an Sendetürmen

Schadensgrad	Art des Schadens
A und B	Türme zerstört oder umgekippt am Boden (Bild 4.109 a)
C	Türme teilweise ausgeknickt, aber durch Halteseile gehalten; zum Senden nicht mehr geeignet
D	Halteseile etwas durchhängend, Sendeturm aber betriebsfähig (Bild 4.109 b)



Bild 6.24a Waldbestand nach einer Kernexplosion, Schadensgrad B (0,266 kg/cm² Überdruck)



Bild 6.24b Waldbestand nach einer Kernexplosion, Schadensgrad C (0,168 kg/cm² Überdruck)

Schäden an Forsten

6.24 Bei der Erörterung der Schäden an Forsten sind in dieser Abhandlung im großen ganzen nur natürliche Laub- und Nadelwaldbestände mit etwa 430 Bäumen je Hektar betrachtet worden. Da Bäume besonders empfindlich gegen Strömungswiderstände sind, ist die Zone, in welcher der Schadensgrad A sich auf den Schadensgrad D verringert, verhältnismäßig schmal. Insbesondere ist der Übergang vom Schadensgrad A zum Schadensgrad B schwer abzugrenzen, deshalb sind diese beiden Schadensgrade zusammengefaßt worden. In Tabelle 6.24 sind die verschiedenen Schadensmerkmale dargestellt. Da die Wirkung des Luftstoßes auf Wälder ähnlich ist wie die Wirkung starker Winde, sind die Geschwindigkeiten gleichmäßiger Winde, die vergleichbare Schäden verursachen würden, in die Tabelle mit aufgenommen worden.

Tabelle 6.24 Schadensmerkmale an Forsten

Schadensgrad	Art des Schadens	Gleichwertige Orkan-Geschwindigkeit km/h
A und B	Bis zu 90% der Bäume umgeblasen; von dem Rest Zweige und Blätter abgerissen (Bild 6.24a) (Gebiet unpassierbar für Fahrzeuge; zu Fuß nur sehr schwer begehbar)	208–224
C	Etwa 30% der Bäume umgeblasen; von dem Rest einige Zweige und Blätter abgerissen (Bild 6.24b). (Gebiet für Fahrzeuge erst nach gründlicher Bereinigung befahrbar)	144–160
D	Sehr wenige Bäume umgeblasen; einige Zweige und Blätter abgerissen. (Gebiet für Fahrzeuge befahrbar)	96–128

6.25 Das Verhältnis des Schadens zur Entfernung bei durchschnittlichen Waldbeständen ist in Bild 6.41c gegeben. Die Entfernungen sind bei Laubwaldbeständen etwas größer als der Durchschnitt, wogegen sie bei Nadelwaldbeständen um ein Geringes kleiner sind.

Schäden aus Erd- und Wasserstößen

Bauten unter Erdgleiche

6.26 Ein Bauwerk unter Erdgleiche kann so konstruiert werden, daß es praktisch unempfindlich gegen Luftstoß wird (s. Abschn. 6.14); solche Gebäude können aber durch Kraterbildung oder durch Erdstoßwellen auf Grund einer nahe der Erdoberfläche, direkt an der Erdoberfläche oder unter der Erde erfolgenden Explosion beschädigt oder zerstört werden. Das durchschnittliche Raumgewicht eines Bauwerks unter Erdgleiche wird gewöhnlich niedriger sein als das des verdrängten Erdbodens. Außerdem ist bekannt, daß der Druckimpuls im Erdboden bei einer Boden- oder Untererdexplosion verhältnismäßig lang im Vergleich zu den Abmessungen des Bauwerks ist, und daß der Druck an der Stoßfront nicht steil ansteigt.

6.27 Auf Grund dieser Tatsachen ist zu erwarten, daß Bauwerke unter Erdgleiche mit verhältnismäßig kleinen Abmessungen von dem Stoß »mitgerissen« werden. Diese Annahme ist durch praktische Erfahrungen bestätigt worden. Die Bewegung des Bauwerks ist eng verbunden mit der Bewegung des Erdbodens, wenn die Stoßwelle auftritt. Mit anderen Worten: wenn die Teilchenbeschleunigung im Erdboden bestimmte horizontale und vertikale Spitzenkomponenten hat, dann ist zu erwarten, daß das kleine unterirdische Bauwerk fast die gleichen maximalen Beschleunigungskomponenten hat.

6.28 Wie in Abschn. 5.18ff. angeführt, können die Merkmale der durch Kraterbildung und Erdstoß verursachten Schäden in drei Bereiche eingeteilt werden, nämlich 1. den eigentlichen Krater, 2. den Bereich, der sich etwa bis zur Grenze der plastischen Zone erstreckt, d. h. bis etwa das $2^1/_2$fache des Kraterradius, und 3. die Zone, in welcher vorübergehende Erdbewegungen stattfinden, ohne meßbare dauernde Verformungen hervorzurufen, da in diesem Bereich keine nennenswerten Schäden durch Erdstöße entstehen.

6.29 Der für die Beschädigung hauptsächlich verantwortliche Stoßparameter ist weder theoretisch noch erfahrungsmäßig bestimmt worden. Es hat jedoch stark den Anschein, daß der Schadensgrad zu dem Kraterradius in Beziehung gesetzt werden kann, ohne daß größere Fehler hierbei entstehen. Einige Beispiele für dieses Verhältnis sind in Tabelle 6.29 gegeben. Auf Grund der in Abschn. 5.18 erwähnten Faktoren sind gewisse geringe Schwankungen in den Entfernungen sowie in den Merkmalen des Bodens oder Gesteins vorhanden, in dem das Bauwerk liegt. Wir werden sehen, daß – wie zu erwarten – außerhalb der plastischen Zone, d. h. in einer Entfernung vom Nullpunkt, die größer ist als das $2^1/_2$fache des Kraterradius, kein nennenswerter Schaden durch einen Erdstoß entsteht.

Tabelle 6.29 Schadensmerkmale durch Erdstöße an Bauten in mittlerer Tiefe unter Erdgleiche

Gebäudetyp	Schadensgrad	Entfernung vom Nullpunkt	Art des Schadens
Verhältnismäßig klein, massiv,	A und B	$1^1/_4$ Kraterradius	Einsturz oder schwere Verschiebung
luftstoßsichere Konstruktion	C	$1^1/_4$- bis 2mal Kraterradius	Stoßschäden an Inneneinrichtung
(Schutzraumbau)	D	2- bis $2^1/_2$mal Kraterradius	Lösung spröder Verbindungen, leichte Risse an baulichen Unstetigkeiten
Verhältnismäßig	A	$1^1/_2$ Kraterradius	Verformungen und Bruch
lang, elastisch	B	$1^1/_2$- bis 2mal Kraterradius	leichte Verformungen, einige Bruchstellen
(Rohrleitungen)	C	2- bis 3mal Kraterradius	Versagen der Verbindungen

6.30 Ein massiver unterirdischer Stahlbetonschutzraum ist ein Beispiel des in Tabelle 6.29 angezogenen Gebäudetyps. Dieses Bauwerk wird voraussichtlich in dem Bereich außerhalb des Kraters den Angriff überleben. Es muß jedoch auf die Tatsache aufmerksam gemacht werden, daß das Gebäude mit der hochradioaktiven Erde (s. Abschn. 9.58) des Kraterwalles bis zur Grenze des Schadensgrades C bedeckt sein würde.

6.31 Versorgungsrohrleitungen unter Erdgleiche sind typisch für das lange, elastische Bauwerk in Tabelle 6.29. Die Beschädigungen in den Schadenszonen A und B sind hauptsächlich durch die bleibende Verschiebung des Erdbodens ent-

standen; in der Schadenszone C beruhen die Schäden auf ständigen oder vorübergehenden Beanspruchungen. Die Entfernung, auf welche sich die Schadenszone C erstreckt, hängt ab von der Orientierung der Rohrleitung zum Explosionspunkt. Eine radiale Orientierung wird voraussichtlich größere Beschädigungen verursachen als eine Querorientierung in einem gegebenen Bereich. Eine Zerstörung erfolgt wahrscheinlich an baulichen Unstetigkeiten, wie z. B. an den seitlichen Verbindungen und Eingangstüren. Dies wird insbesondere dann der Fall sein, wenn spröde Materialien verwendet sind.

6.32 Obwohl Tunnel und Untergrundbahnen innerhalb des Kraterbereiches zerstört und außerhalb desselben beschädigt würden, sind diese Bauwerke, insbesondere, wenn sie durch hartes Gestein getrieben und so ausgekleidet sind, daß ein Absplittern kaum möglich ist, sehr widerstandsfähig gegen Erdstöße. Das Gestein wird, da es ein elastisches Medium ist, die Druckwelle gut weiterleiten, und wenn diese Welle auf die Tunnelwand auftrifft, wird eine negative Druckwelle (Zugwelle) von der Grenzfläche zwischen Gestein und Luft reflektiert[1]).

6.33 Unter Umständen wird ein Versagen des Gesteins an der Tunnelwand zu einem Absplittern führen, wenn die bei der Reflexion entstehende Zugbeanspruchung stärker ist als die Zugfestigkeit des Gesteins. Die Dicke der Absplitterung ist abhängig von der Stärke, der Dauer und der Form der Druckwelle, von der Größe und Form des Tunnels und von den physikalischen Eigenschaften des Gesteins.

6.34 Liegt ein Bauwerk teils über, teils unter Erdgleiche, so wird der Schaden an dem unter Erdgleiche liegenden Teil etwa dem in Tabelle 6.29 beschriebenen gleichen, falls die Wände dick genug sind. Jedoch wird in der Regel bei Boden- und Unterwasserexplosionen die Zerstörung durch den Luftstoß sich weit über die plastische Zone, die dritte der o. a. Zonen, hinaus erstrecken. Für den Gesamtschaden ist dann der Luftstoß bestimmend; er entspricht etwa den Beschreibungen in den Anfangsteilen dieses Kapitels.

Schaden an Schiffen durch die Wasserstoßwelle

6.35 In Kap. V war die Wirkung einer Wasserstoßwelle auf Schiffe auf Grund der Erfahrungen bei dem *Baker*-Versuch in Bikini beschrieben. Bei den meisten Unterwasserexplosionen wird die Wasserstoßwelle ein wichtiger Faktor für die Schadensermittlung sein. Ausnahmen von dieser Regel können eintreten, wenn die Unterwasserexplosion nahe der Oberfläche erfolgt oder wenn eine Waffe von sehr großem Explosionswert in geringer Tiefe unter Wasser explodiert. In diesen Fällen würde der Luftstoß bedeutungsvoller sein als die Wasserstoßwelle.

6.36 Die verschiedenen Arten der Beschädigung von Schiffen durch eine Wasserstoßwelle sind genauso beschrieben wie beim Luftstoß. Deshalb sind die Beschrei-

[1]) Die Bildung einer negativen Druckwelle bei Reflexion einer Druckwelle an der Oberfläche eines weniger dichten Mediums (Luft) ist ausführlicher in der Abhandlung über Stoßwellen im Wasser beschrieben (Abschn. 5.23).

bungen in Tabelle 6.21 anwendbar, ohne Rücksicht darauf, ob die Wasserstoßwelle oder der Luftstoß die Hauptursache für den Schaden ist. Die Beziehung der Schadensgrade an Handelsschiffen zur Entfernung von einer Unterwasserexplosion in einem Hafengebiet als Funktion des Explosionswertes der Waffe ist in Bild 6.41 c angegeben.

Schaden an Bauwerken unter Wasser

6.37 Wie beim Luftstoß wird auch bei einer Wasserstoßwelle der Schaden an einem Bauwerk unter Wasser von den Abmessungen des Bauwerks und bestimmter charakteristischer Zeiten abhängen. Die bedeutsam erscheinenden Zeiten sind einerseits die Zeitkonstante der Stoßwelle (Abschn. 5.50) und andererseits die natürliche Reaktions-(oder plastische)Zeit und die Beugungszeit des Bauwerks, d. h. die Zeit, die die gebeugte Druck-(Stoß)Welle braucht, um Entfernungen zurückzulegen, die in der Größenordnung der Bauwerksabmessungen liegen. Befindet sich das Unterwasserbauwerk nahe der Wasseroberfläche, so würde in bestimmten Fällen die Abfallzeit (Abschn. 5.26) bedeutungsvoll werden.

6.38 Ist die Zeitkonstante der Druckwelle im Vergleich zu den für das Bauwerk charakteristischen Zeiten lang, d. h. ist die Wasserstoßwelle von verhältnismäßig langer Dauer, dann ist die Wirkung des Stoßes ähnlich wie die eines gleichbleibenden (oder statischen) Druckes. Unter diesen Umständen ist die Überdruckspitze das geeignete Schadensmerkmal. Das wäre der Fall bei kleinen, starren Unterwasserbauwerken, da diese wahrscheinlich kurze charakteristische Zeiten haben.

6.39 Bei großen, starren Unterwasserbauwerken, bei denen die Dauer der Stoßwelle im Vergleich zu den charakteristischen Zeiten des Bauwerks kurz ist, wird der Impuls der Stoßwelle für die Beschädigung bestimmend sein (Bild 5.48). In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß der Impuls und der Schaden weitgehend verringert werden, wenn die an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft reflektierte Welle das Ziel kurz nach Ankunft der primären Stoßwelle erreicht.

6.40 Wenn ein großes Unterwasserbauwerk größere bleibende (plastische) Verformungen durch den Zusammenstoß mit der Stoßfront hinnehmen kann, so scheint es, daß der Schaden im wesentlichen von der Energie der Stoßwelle abhängt (Bild 5.48). Liegt das Bauwerk nahe der Wasseroberfläche, dann verringert die »Abfall«-Wirkung die zur Verursachung des Schadens verfügbare Energie des Stoßes.

Schadensberechnung

Verhältnis des Schadens zur Entfernung

6.41 Durch Kombination der nach den Explosionen in Japan gesammelten Informationen und den Ergebnissen verschiedener Kernversuche mit einer theoretischen Analyse der Belastung und Reaktion von Bauwerken ist, wie nachstehend

dargelegt, in dem technischen Teil dieses Kapitels das Verhältnis zwischen dem Explosionswert, der Entfernung vom Nullpunkt und dem Schadensgrad bei mehreren Arten von Bauwerken entwickelt worden. Die Ergebnisse einer typischen Luftexplosion (AB)[1]) und einer Bodenexplosion (SB)[2]) sind in den Diagrammen in Bild 6.41 a, b und c zusammengefaßt. Bild 6.41 a befaßt sich mit den Wirkungen des Luftstoßes auf Bauwerke, die hauptsächlich druckempfindlich während der Beugungsphase sind, wogegen die in Bild 6.41 b und c angezogenen Bauwerke hauptsächlich gegen Strömungswiderstand empfindlich sind. In Bild 6.41 c sind auch die Schäden an Schiffen aus einer Unterwasserexplosion im Hafengebiet und Wärmeschäden an Flugzeugen einbezogen. Beispiele für die Anwendung dieser graphischen Darstellungen sind in den Erläuterungen zu den einzelnen Bildern gegeben.

Zu 6.41 a: Aus dem Nomogramm in Bild 6.41 a kann die Art der Beschädigung verschiedener druckempfindlicher Bauwerke in jeder gegebenen Entfernung vom Nullpunkt bei einer Explosion von bestimmtem Explosionswert ermittelt werden. Die Bezeichnungen A, B, C und D in den Feldern beziehen sich auf Schadensgrade von abnehmendem Umfange, wie auch im Text erläutert ist. Die Abkürzungen »SB« und »AB« am Kopf der einzelnen Felder bedeuten Bodenexplosion (»*s*urface *b*urst«) bzw. Luftexplosion (»*a*ir *b*urst«).

Umrechnung. Das Diagramm kann für Explosionswerte im Bereich von 1 Kilotonne bis zu 20 Megatonnen benutzt werden. Bei W Megatonnen (über 20 Megatonnen) lautet das Umrechnungsgesetz

$$d = \frac{W^{1/3}}{2{,}71} d_0 \text{ bei } W > 20 \text{ Megatonnen;}$$

hierbei ist

d = die Entfernung vom Nullpunkt bei einer Explosion von W Megatonnen (>20 Megatonnen), in der ein bestimmter Schaden entsteht,

und d_0 = die Entfernung vom Nullpunkt bei einer 20 Megatonnen-Explosion, die den gleichen Schaden verursacht.

Beispiel:

Gegeben: eine Luftexplosion von 1 Megatonne.

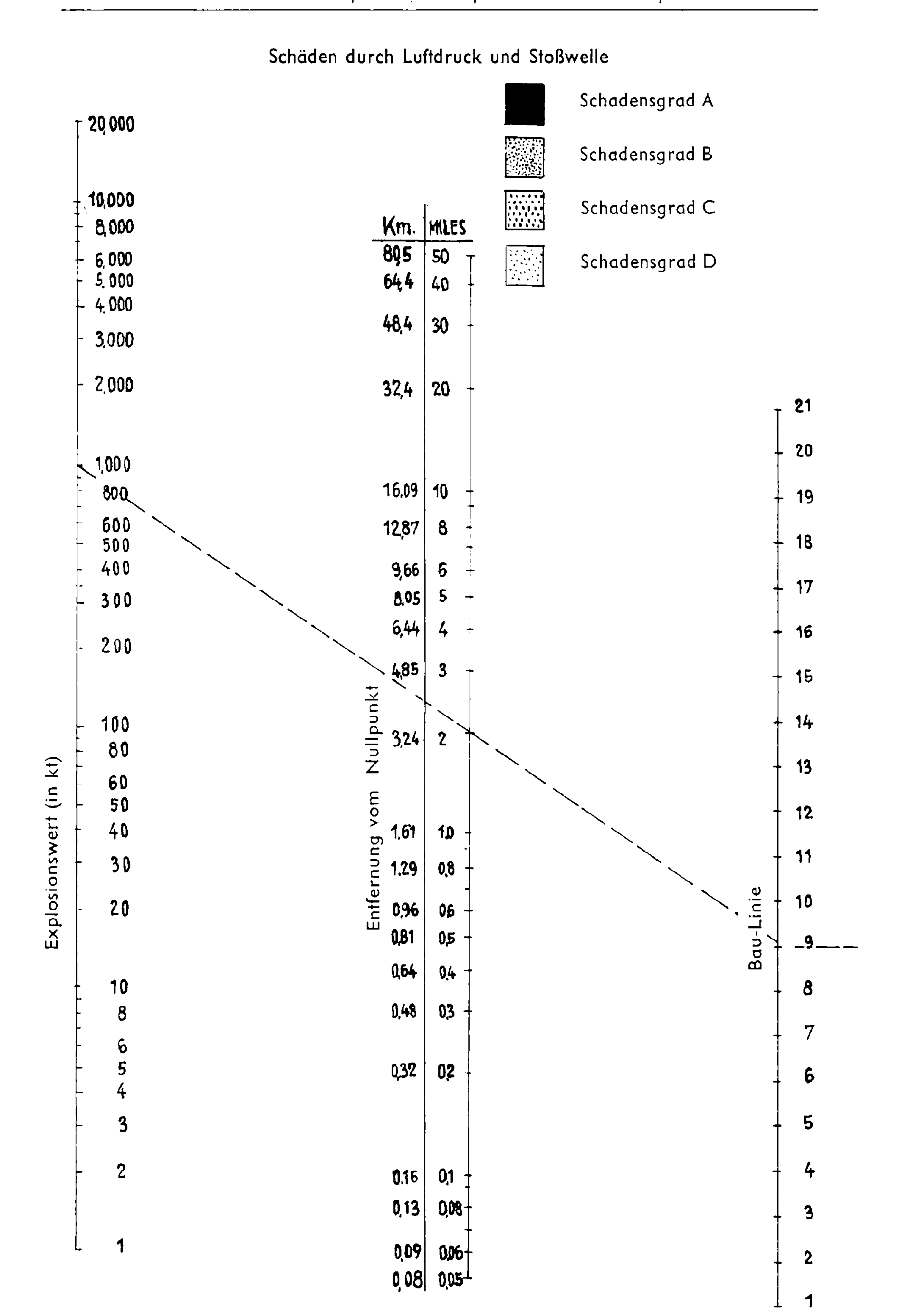
Suche: die Art der Beschädigung an a) einem luftstoßsicheren Stahlbetonbauwerk, b) einem herkömmlichen Stahlbetonbauwerk, c) einem Fachwerkhaus, 3,2 km vom Nullpunkt.

Lösung: Suche den Punkt auf der linken Skala des Nomogramms, der 1 Megatonne angibt, und den Punkt auf der mittleren Skala, der die Entfernung von 3,2 km angibt; ziehe eine Gerade durch diese Punkte, bis sie die Linie auf der rechten Skala schneidet (»Hilfslinie«). Von dem Schnittpunkt ziehe eine Waagerechte durch die Felder, die den Schadensgrad anzeigen.

---

[1]) AB = *A*ir *B*urst.

[2]) SB = *S*urface *B*urst.


Schäden durch Luftdruck und Stoßwelle
Schadensgrad A
Schadensgrad B
Schadensgrad C
Schadensgrad D
Explosionswert (in kt)
20,000
10,000
8,000
6,000
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
800
600
500
400
300
200
100
80
60
50
40
30
20
10
8
6
5
4
3
2
1
Entfernung vom Nullpunkt
Km.
MILES
80,5 50
64,4 40
48,4 30
32,4 20
16,09 10
12,87 8
9,66 6
8,05 5
6,44 4
4,85 3
3,24 2
1,61 1,0
1,29 0,8
0,96 0,6
0,81 0,5
0,64 0,4
0,48 0,3
0,32 0,2
0,16 0,1
0,13 0,08
0,09 0,06
0,08 0,05
Bau-Linie
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

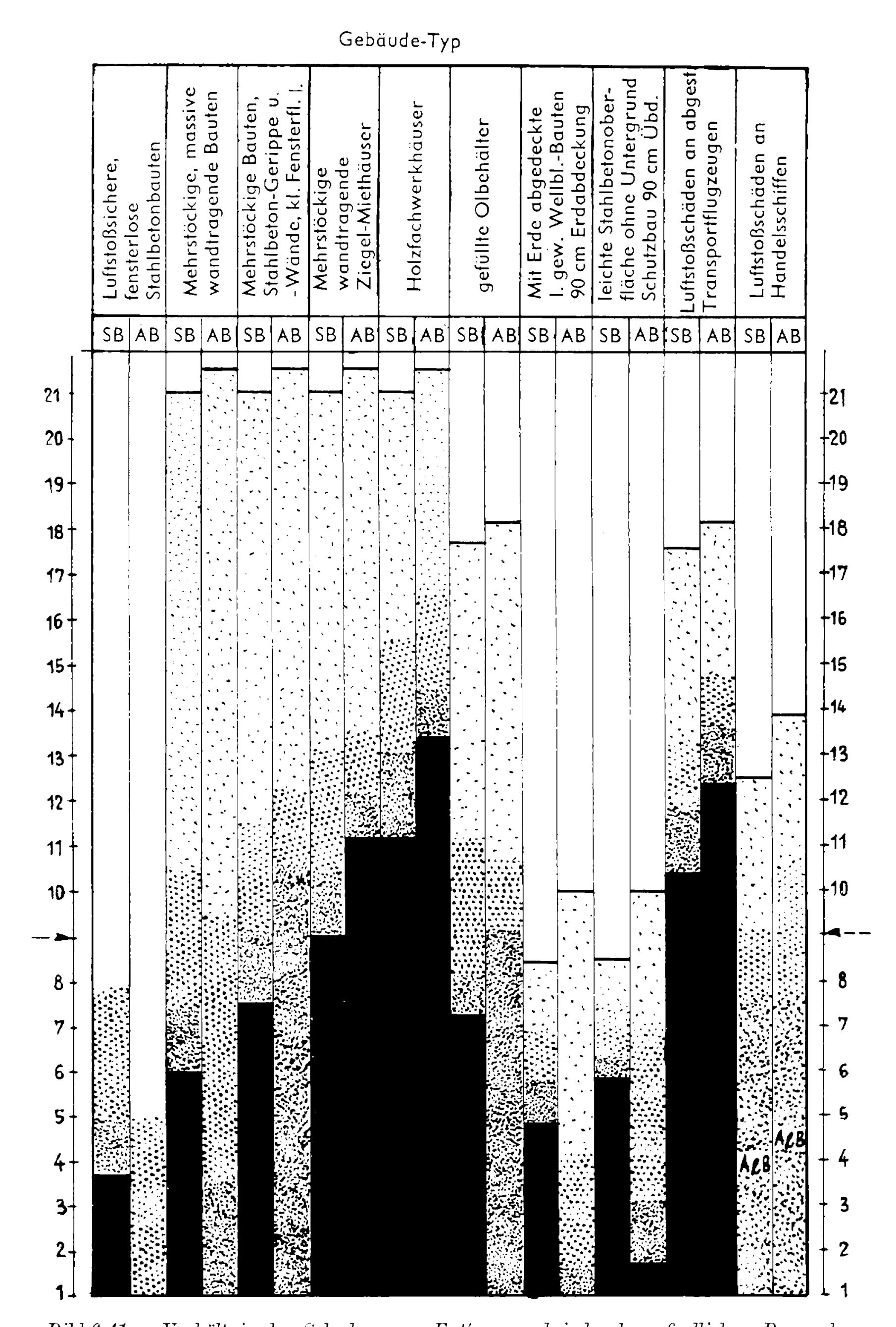


Bild 6.41a Verhältnis des Schadens zur Entfernung bei druckempfindlichen Bauwerken

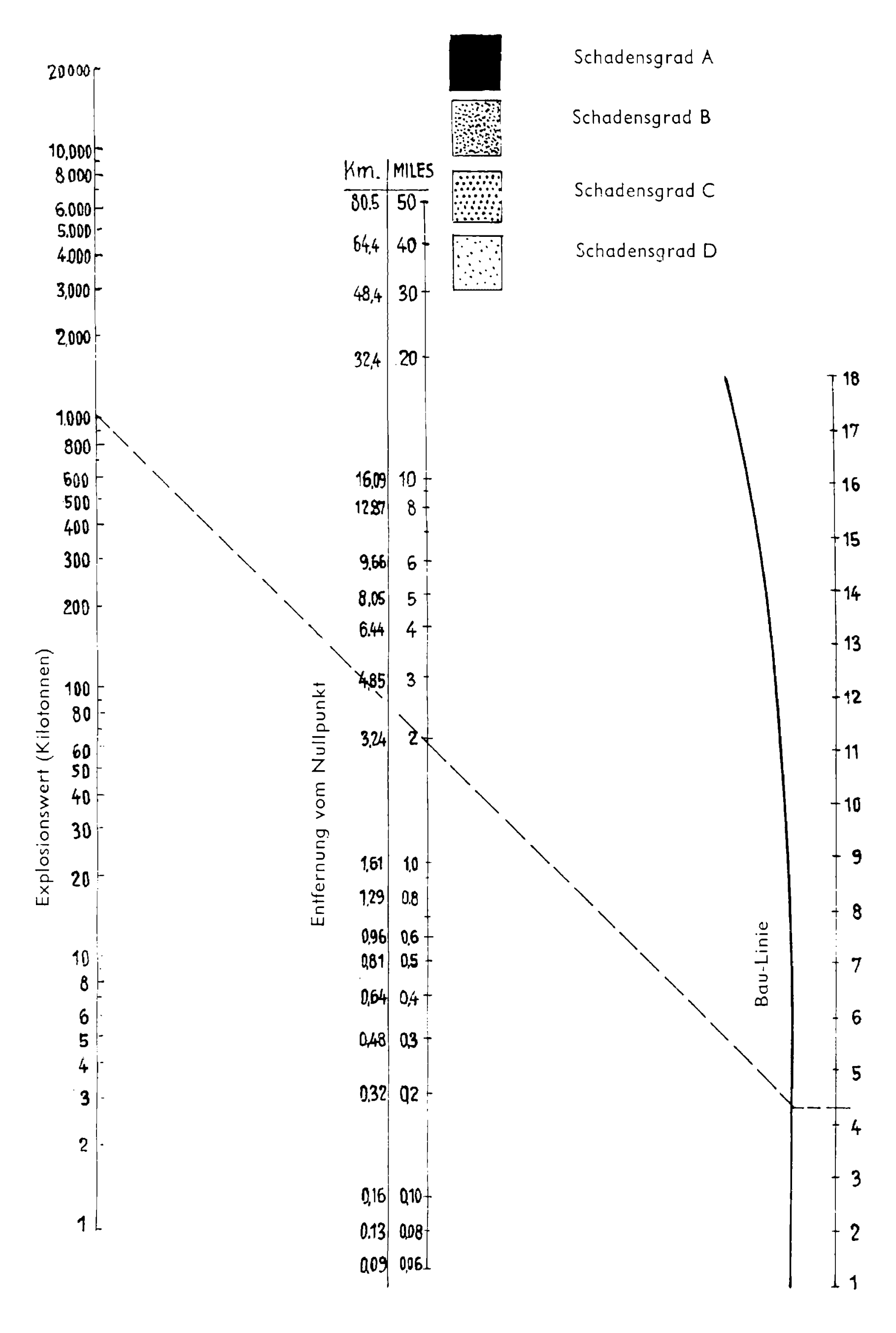
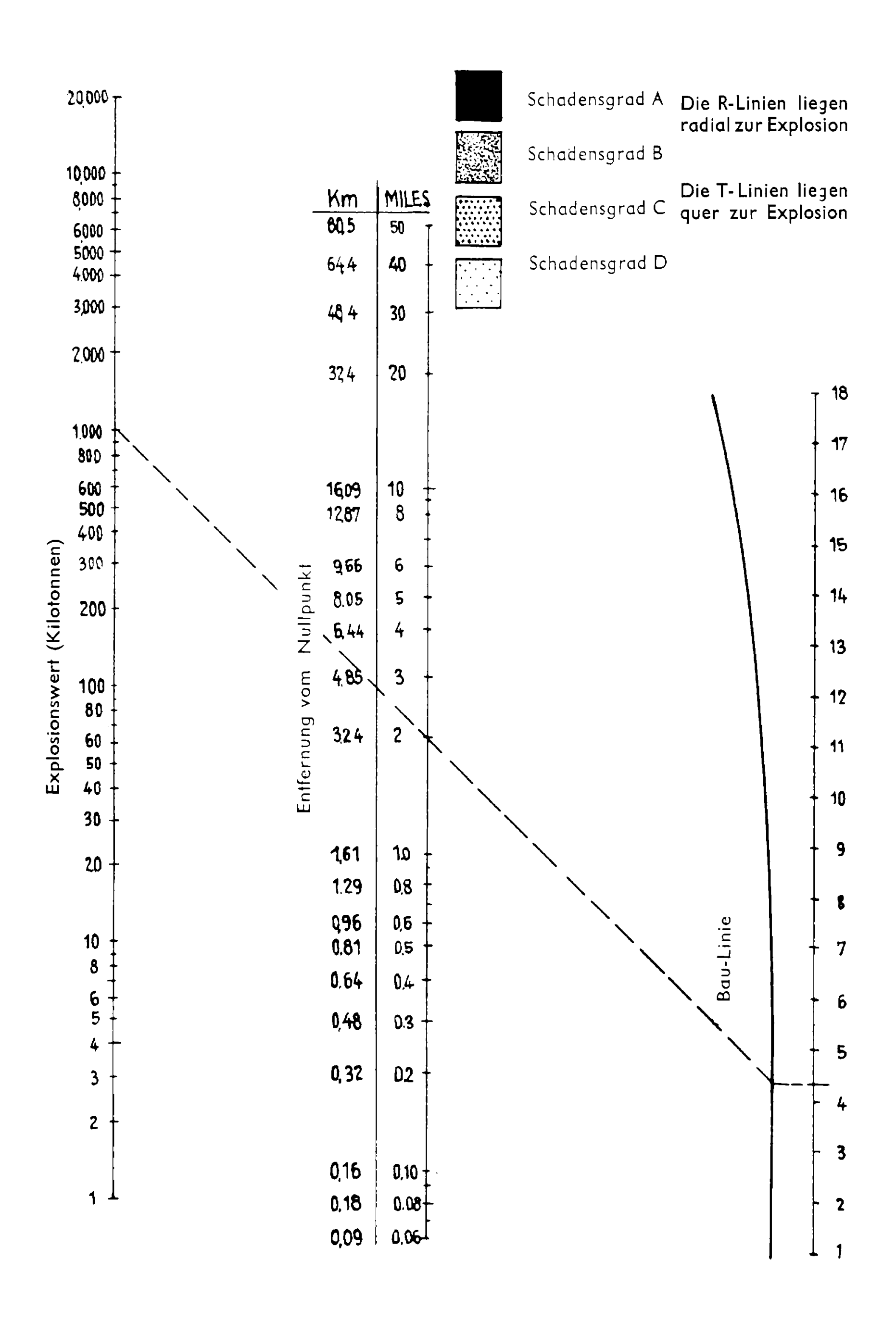

Schäden durch Luftdruck und Stoßwelle
Schadensgrad A
Schadensgrad B
Schadensgrad C
Schadensgrad D
Explosionswert (Kilotonnen)
20000
10,000
8.000
6.000
5.000
4.000
3,000
2,000
1.000
800
600
500
400
300
200
100
80
60
50
40
30
20
10
8
6
5
4
3
2
1
Entfernung vom Nullpunkt
Km.
MILES
80,5 50
64,4 40
48,4 30
32,4 20
16,09 10
12,87 8
9,66 6
8,05 5
6,44 4
4,85 3
3,24 2
1,61 1,0
1,29 0,8
0,96 0,6
0,81 0,5
0,64 0,4
0,48 0,3
0,32 0,2
0,16 0,10
0,13 0,08
0,09 0,06
Bau-Linie
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

Bild 6.41b Strömungswiderstandsempfindliche Bauten, Verhältnis Schaden/Entfernung

Schäden durch Luftdruck und Stoßwelle



Reaktion der Objekte auf Luftstöße Gebäude-Typ

Diesel- u. Dampflokomotiven, Orientierung von einem Ende aus		Diesel- u. Dampflokomotiven, seitliche Orientierung		Eisenbahn-Rollmaterial		Motorfahrzeuge		abgestellte Transport-Flugzeuge Wärmeschäden		Wälder (432 Bäume je ha)		Telefon- und Strom-Freileitungen		Rundfunk- und Fernseh-Sendetürme (60–152 m hoch)		Handelsschiffe im Hafen
SB	AB	SB	AB	SB	AB	SB	AB	SB	AB	SB	AB	SB	AB	SB	AB	UW

Unterwasser-Explosion

T T R R A & B A & B A & B A & B A & B

18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Bild 6.41c Verhältnis des Schadens zur Entfernung bei strömungswiderstandsempfindlichen Bauwerken (außer Gebäuden)

Antwort: a) Ein luftstoßsicheres Stahlbetonbauwerk wird im wesentlichen keinen baulichen Schaden erleiden;

b) ein herkömmliches Stahlbetonbauwerk wird den Schadensgrad B erleiden;

c) ein hölzernes Fachwerkhaus wird den Schadensgrad A erleiden, d. h. im wesentlichen völlige Zerstörung.

Zu Bild 6.41b und c: Aus den Nomogrammen und graphischen Darstellungen in Bild 6.41 b und c kann die Art der Beschädigung verschiedener strömungswiderstandsempfindlicher Bauwerke in jeder gegebenen Entfernung vom Nullpunkt bei einer Explosion von bestimmtem Explosionswert ermittelt werden. Die Bezeichnungen A, B, C und D in den Feldern beziehen sich auf Schadensgrade von abnehmendem Umfange, wie auch im Text erläutert ist. Die Abkürzungen »SB« und »AB« am Kopf der einzelnen Felder bedeuten Bodenexplosion (»surface burst«) bzw. Luftexplosion (»air burst«).

Umrechnung: Bei Explosionswerten über 20 Megatonnen kann das gleiche Kubikwurzel-Umrechnungsgesetz wie zu Bild 6.41 a für druckempfindliche Bauwerke angewandt werden.

Beispiel:

Gegeben: eine Luftexplosion von 1 Megatonne.

Suche: die Art der Beschädigung an a) einer Fachwerkbrücke, b) einem Stahlgerippe-Industriebauwerk mittlerer Festigkeit, c) öffentlichen Versorgungsleitungen (Strom- und Telefonleitungen über der Erde), 3,2 km vom Nullpunkt.

Lösung: Suche den Punkt auf der linken Skala des Nomogramms, der 1 Megatonne angibt, und den Punkt auf der mittleren Skala, der die Entfernung von 3,2 km angibt; ziehe eine Gerade durch diese Punkte, bis sie die Linie auf der rechten Skala (»Hilfslinie«) schneidet. Von dem Schnittpunkt ziehe eine Waagerechte durch die Felder, die den Schadensgrad anzeigen.

Antwort: a) Eine Fachwerkbrücke wird – unter mehr oder weniger Berücksichtigung ihrer Länge – den Schadensgrad C erleiden;

b) Ein Stahlgerippe-Industriegebäude von mittlerer Festigkeit wird bei einer Luftexplosion den Schadensgrad A erleiden;

c) Öffentliche Versorgungsleitungen (Strom- und Telefonleitungen über der Erde) werden den Schadensgrad A erleiden ohne Rücksicht darauf, ob sie radial oder quer zur Richtung der Luftdruckwelle orientiert sind.

6.42 Wie in Abschnitt 6.4 dargelegt, ist das für die Schadensklassifizierung angewandte System eine Abänderung des von der FCDA eingeführten Zonensystems zur Beschreibung der Schäden an einem durchschnittlichen Stadtkomplex. In dieser Abhandlung beziehen sich jedoch die Buchstaben A, B, C und D auf die Schadens-

grade von abnehmendem Umfange bei Einzelbauwerken oder -objekten. Ausführliche Beschreibungen dieser Schadensgrade sind weiter oben in verschiedenen Tabellen gegeben; mit einfachen Worten erklärt, bedeuten sie folgendes: Schadensgrad A bedeutet praktisch völlige Zerstörung; Schadensgrad B bezieht sich auf starke Zerstörungen, die sehr umfangreiche (vielleicht sogar untragbare) Instandsetzungsarbeiten erfordern; Schadensgrad C würde größere Instandsetzungsarbeiten erfordern, bevor das Objekt oder Bauwerk seinem beabsichtigten Zweck dienen könnte; Schadensgrad D würde geringe Instandsetzungsarbeiten erfordern oder sogar eine Weiterbenutzung ohne Reparaturen zulassen.

6.43 Die in Bild 6.41a, b und c gemachten Angaben gelten für bestimmte durchschnittliche Zielverhältnisse. Sie setzen die Annahme voraus, 1. daß das Ziel sich in Meereshöhe befindet; (falls die Zielhöhe unter 1500 m liegt, ist keine Berichtigung erforderlich); 2. daß das Gelände ziemlich flach ist (unebenes Gelände würde einige örtliche Abschirmung und Schutz schaffen); 3. daß das Bauwerk durchschnittliche Merkmale aufweist (d. h., daß es von durchschnittlicher Größe und Festigkeit ist). Bei der Anwendung der Ergebnisse auf Verhältnisse, die stark vom Durchschnitt abweichen, müssen alle eventuellen Abänderungen dem Ermessen des Berechners überlassen werden.

6.44 Da es sich in Bild 6.41a um druckempfindliche Bauwerke handelt, ist die Überdruckspitze das bezeichnende Schadensmerkmal. Infolgedessen sind bei einem bestimmten Schaden die Entfernungen vom Nullpunkt durch das bekannte Kubikwurzelgesetz zum Explosionswert in Beziehung gebracht worden (Abschn. 3.86ff.) Für strömungswiderstandsempfindliche Bauwerke (Bild 6.41b und c) ist dieses Umrechnungsgesetz jedoch nicht anwendbar (Abschn. 3.66). Falls es aber erforderlich wird, die Ergebnisse auf Explosionen von mehr als 20 Megatonnen (den höchsten in den Diagrammen angeführten Wert) auszudehnen, dann kann das Kubikwurzelgesetz sowohl für druckempfindliche als auch für strömungswiderstandsempfindliche Ziele angewandt werden, vorausgesetzt, daß die Bezugsexplosion mit 20 Megatonnen angenommen wird. Wenn also d die Entfernung vom Nullpunkt bei einer Explosion von W Megatonnen (d. i. über 20 Megatonnen) ist, in der ein bestimmter Schadensgrad erwartet wird, und wenn d_0 die Entfernung von einer 20-Megatonnen-Explosion bei gleichem Schaden ist, dann ist

$$\frac{d}{d_0} = \left(\frac{W}{20}\right)^{1/3} \quad \text{oder} \quad d = \frac{W^{1/3}}{2{,}71}\, d_0 \,.$$

Da d_0 aus den Diagrammen zu entnehmen ist, kann der Wert für d bei einem Explosionswert von W Megatonnen (d. i. über 20 Megatonnen) leicht berechnet werden.

6.45 Abschließend wäre zu erwähnen, daß in den Schadensdiagrammen nicht die Möglichkeit eines Brandes in Erwägung gezogen ist. Im allgemeinen sind – abgesehen von stoffbespannten Flächen an Flugzeugen, für welche besondere Angaben in dieser Abhandlung enthalten sind – die direkten Wirkungen der thermischen Strahlung auf Bauwerke und andere Ziele unbedeutend. Jedoch kann die thermische Strahlung Brände entfachen, und es können in Bauwerken, die den Schadensgrad A, B oder C

erlitten haben, durch Gasrohrbrüche und Beschädigung elektrischer Anlagen Brände ausbrechen. In manchen Fällen, wie z. B. in Hiroshima (Abschn. 7.100), können sich Einzelbrände zu einem Feuersturm entwickeln, der eine ganze Stadt erfassen und sich über den Bereich größerer Luftdruckschäden hinaus erstrecken kann. Die Ausbreitung eines solchen Feuers hängt weitgehend von den örtlichen Wetter- (und sonstigen) Verhältnissen ab und ist deshalb schwer vorauszusagen. Diese Einschränkung muß berücksichtigt werden, wenn die Bilder 6.41 a, b und c für eine Schadensberechnung in einer bestimmten Stadt oder einem bestimmten Zielgebiet verwendet werden.

Reaktion von Objekten auf Luftstoß[1])

Die Entwicklung der Luftdruckbelastung

6.46 Da genaue Unterlagen über die Wirkungen des Luftstoßes aus Kernexplosionen auf Bauwerke etwas begrenzt sind, besteht das übliche Verfahren zur Schätzung von Luftdruckschäden aus einer Analyse, die sich auf verfügbare Ergebnisse von Labor- und Originalversuchen stützt. Das erste Stadium dieser Analyse ist die Ermittlung der Luftdruckbelastung auf das in Frage kommende Bauwerk; dann folgt eine Berechnung der Reaktion auf diese Belastung. Da Bauwerke im allgemeinen sehr verschiedenartig sind, ist in dieser Abhandlung eine Anzahl idealisierter Ziele von einfacher Form zugrunde gelegt.

6.47 Die Luftdruckbelastung auf ein Objekt ist eine Funktion der Daten der einfallenden Luftdruckwelle (d. h. der Überdruckspitze, des dynamischen Druckes, des Abklingens und der Dauer der Luftdruckwelle) (s. Beschreibung in Kap. III), und der Größe, Form, Orientierung und Reaktion des Objekts. Die Wirkung der einfallenden Luftdruckwelle auf ein Objekt ist ein komplizierter Prozeß, für den eine Theorie entwickelt worden ist, die sich hauptsächlich auf Erfahrungen mit Stoßwellenrohren und Windkanälen stützt. Um das schwierige Problem der Luftdruckbelastung zu vereinfachen, wird in dieser Abhandlung angenommen, daß 1. die betreffenden Überdrücke unter 3,5 kg/cm² liegen, 2. das belastete Objekt sich im Bereich der Machschen Reflexion befindet.

6.48 Um eine Vorstellung von dem Prozeß der Luftdruckbelastung zu erhalten, ist ein einfaches Objekt, nämlich ein Würfel, als Beispiel gewählt worden, dessen eine Seite der Explosion zugewandt ist. Es wird ferner vorausgeschickt, daß der Würfel fest mit der Erdoberfläche verankert ist und unbeweglich bleibt, wenn er der Belastung ausgesetzt wird. Die Front der Luftdruckwelle wird im Verhältnis zu dem Würfel so angenommen, als wäre sie eine flache Welle, die auf den Würfel auftrifft. Die unten angeführten Drücke sind dann die durchschnittlichen Drücke auf eine

[1]) Die übrigen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

bestimmte Seitenfläche. Da das Objekt sich im Bereich der Machschen Reflexion befindet, liegt die Luftstoßfront rechtwinklig zur Erdoberfläche. Die Vorderseite des Würfels, d. h. die der Explosion zugewandte Seite, liegt senkrecht zur Richtung der Ausbreitung der Luftdruckwelle (Bild 6.48).

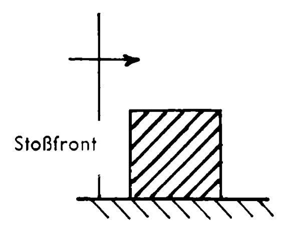


Bild 6.48 Luftdruckwelle, die sich dem fest im Erdboden verankerten Würfel nähert.

6.49 Wenn die Stoßwelle auf die Vorderseite des Würfels auftrifft, erfolgt eine Reflexion, die (reflektierte) Überdrücke erzeugt, welche zwei bis achtmal so stark sein können wie der einfallende Überdruck (Abschn. 3.81). Dann umfließt die Stoßwelle den Würfel, wobei sie Drücke auf die Seiten und die Oberseite des Objektes und alsdann auf seine Rückseite ausübt. Das Objekt wird somit in den hohen Druck der Stoßwelle hineingezogen; diese klingt mit der Zeit ab und gleicht sich schließlich den umgebenden Verhältnissen wieder an. Da der reflektierte Druck auf die Vorderseite stärker ist als der Druck in der Stoßwelle oben und an den Seiten, kann der reflektierte Druck nicht aufrechterhalten bleiben; er klingt bald auf einen »Ruhedruck« ab, welcher die Summe des einfallenden Überdrucks und des dynamischen (Strömungswiderstands-)Druckes ist. Die Abklingzeit dauert ungefähr so lange wie die Zeit, die eine Verdünnungswelle benötigt, um von den Kanten der Vorderseite bis in die Mitte dieser Seite und zurück zu den Kanten zu gelangen.

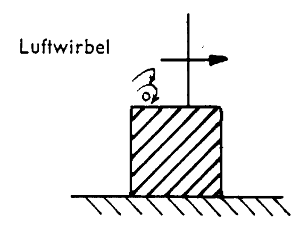


Bild 6.50 Luftstoßwelle, die über die Seiten und die Decke des Würfels wandert.

6.50 Die Drücke auf die Seiten und die Decke des Würfels steigen auf den einfallenden Überdruck, wenn die Luftstoßfront an den in Frage kommenden Punkten ankommt. Darauf folgt eine kurze Periode niedrigen Druckes, der durch einen Luft-

wirbel entsteht, welcher an der Vorderkante während des Beugungsprozesses der Welle gebildet wird und entlang oder nahe der Fläche hinter der Luftstoßfront wandert (Bild 6.50). Nachdem der Luftwirbel vorüber ist, kehrt der Druck im wesentlichen wieder zu dem der einfallenden Luftstoßwelle zurück, die mit der Zeit abklingt. Die Luftströmung verursacht eine leichte Verringerung der Belastung an den Seiten und der Decke, da – wie wir später sehen werden – der Widerstandsbeiwert hier negativ ist.

6.51 Wenn die Luftdruckwelle die Rückseite des Würfels erreicht, wird sie um die Kanten gebeugt und wandert an der Rückseite abwärts (Bild 6.51). Der Druck braucht eine gewisse Zeit (»Aufbauzeit«), um einen mehr oder weniger stationären Wert zu erreichen, der gleich der algebraischen Summe des Überdruckes und des Strömungswiderstandsdruckes ist, wobei der letztere in diesem Falle ebenfalls einen negativen Wert hat. Die begrenzte Aufbauzeit ergibt sich aus einer Abschwächung der Luftstoßfront, wenn sie, begleitet von einer vorübergehenden Wirbelwirkung, die rückwärtigen Kanten umfließt, sowie aus der Durchlaufzeit der Luftdruckwelle von den Kanten bis zur Mitte der Rückseite.

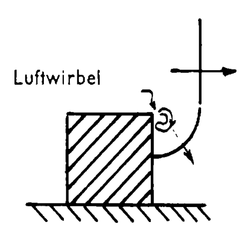


Bild 6.51 Luftstoßwelle, die an der Rückseite des Würfels abwärts wandert.

6.52 Wenn der Überdruck an der Rückseite des Würfels den Wert des Überdruckes in der Luftstoßwelle erreicht hat, kann der Beugungsprozeß als beendet angesehen werden. Danach können gewisse stationäre Verhältnisse angenommen werden, bis die Drücke wieder den Umgebungswert haben, der vor Ankunft der Luftstoßwelle vorhanden war.

6.53 Die Gesamtbelastung auf eine gegebene Seite des Würfels ist gleich der algebraischen Summe des entsprechenden Überdrucks $p(t)$ und des Strömungswiderstandsdruckes. Letzterer wird zu dem dynamischen Druck $q(t)$ in Beziehung gesetzt durch die Formel

$$\text{Strömungswiderstandsdruck} = C_d q(t),$$

wobei C_d, genannt »Widerstandsbeiwert«, einen Wert hat, der abhängig ist von der Orientierung der betreffenden Seite zur Luftstoßfront; dieser Wert kann positiv oder negativ sein. Die Größen $p(t)$ und $q(t)$ stellen den Überdruck bzw. den dynamischen Druck zu einer Zeit t nach Ankunft der Stoßfront dar (Abschn. 3.82, 3.83).

6.54 Die vorstehenden Überlegungen bezogen sich auf die Belastung der verschiedenen Flächen im allgemeinen. In einem bestimmten Punkt auf einer Fläche

hängt die Belastung auch von der Entfernung dieses Punktes von den einzelnen Kanten ab; es ist dann ein ausführlicheres Verfahren erforderlich. Es ist festzustellen, daß hier nur die groben Merkmale des Verlaufs der Belastung beschrieben sind. Tatsächlich sind mehrere Perioden von reflektierten und Verdünnungswellen vorhanden, die über die Flächen wandern, bevor sie vollständig abklingen; diese Schwankungen werden aber in bezug auf die Beschädigung des Bauwerks als wenig bedeutend angesehen.

Einfluß der Größe der belasteten Fläche auf den Verlauf der Belastung

6.55 Die Belastung auf eine einzelne Fläche kann weniger Bedeutung haben als die waagerechte Gesamtbelastung des ganzen Objektes. Deshalb ist es erforderlich, sich mit dieser Gesamtbelastung zu befassen, die der Belastung auf die Vorderfläche abzüglich der Belastung auf die Rückseite des Würfels gleich ist. Die waagerechte Gesamtlast während des Beugungsprozesses ist groß, weil der Druck auf die Vorderseite anfangs der reflektierte Druck ist, bis die Luftstoßwelle die Rückseite erreicht hat.

6.56 Wenn der Beugungsprozeß beendet ist, sind die Überdrucklasten auf die Vorder- und Rückseite im wesentlichen gleich. Die waagerechte Gesamtlast ist dann verhältnismäßig klein. Zu diesem Zeitpunkt besteht die Gesamtlast hauptsächlich aus der Differenz zwischen der Vorderseitenbelastung und der Rückseitenbelastung, die sich aus der dynamischen Drucklast ergibt. Da die für die Vollendung des Beugungsprozesses erforderliche Zeit mehr von der Größe des Objektes abhängt als von der Dauer der einfallenden Luftstoßwelle, ist der Belastungsimpuls je Flächeneinheit während des Beugungsprozesses bei langen Objekten stärker als bei kurzen.

6.57 Die Stärke der dynamischen Druck-(oder Winddruck-)Belastung wird dagegen außerdem von der Form des Objektes und der Dauer der Luftdruckwelle beeinflußt. Letztere – und nicht die Größe des Objektes – bestimmt die Zeitdauer der Einwirkung (und des Impulses je Flächeneinheit) der Winddrucklast.

6.58 Es kann daraus gefolgert werden, daß bei großen Objekten, die von kurzzeitigen Luftdruckwellen getroffen werden, die waagerechte Gesamtlast während des Beugungsprozesses größer ist als die dynamische Druckbelastung. Wird das Objekt kleiner oder die Dauer der Luftdruckwelle länger, z. B. bei Waffen größeren Explosionswertes, so wird die Winddruck-(dynamische Druck-)Belastung zunehmend größer. Für die Zwecke der Klassifizierung werden die Objekte oft als »Beugungsdruckziele« oder »Winddruckziele« bezeichnet (s. Kap. III), um die für den Schaden hauptverantwortliche Belastung zu kennzeichnen. Tatsächlich werden alle Objekte eher durch die Gesamtbelastung beschädigt, welches eine Kombination der Überdruckbelastung und der dynamischen Drucklast ist, als durch irgendeine Komponente der Luftstoßlast.

Einfluß der Form des Objektes auf den Verlauf der Belastung

6.59 Die obige Beschreibung der Wirkung einer Luftdruckwelle bei einem Würfel kann verallgemeinert werden, so daß sie auch für die Belastung auf ein Objekt von anderer Form gilt. Der Reflexionskoeffizient, d. h. das Verhältnis des reflektierten (augenblicklichen) Überdruckes zum einfallenden Überdruck an der Stoßfront, hängt von dem Winkel ab, in welchem die Luftdruckwelle auf das Objekt auftrifft. Bei gekrümmten Objekten, z. B. bei einer Kugel (oder einem Teil einer Kugel) ist die Reflexion innerhalb der einzelnen Punkte der Vorderfläche verschieden. Die Abklingzeit vom reflektierten Druck bis zum Ruhedruck hängt dann von der Größe des Objektes und dem in Frage stehenden Punkt auf der Vorderfläche ab.

6.60 Der Widerstandsbeiwert, d. h. das Verhältnis des Winddruckes zum dynamischen Druck (Abschn. 6.53), ist je nach Form des Objektes verschieden. In vielen Fällen ist ein Gesamt-(oder Durchschnitts-)Widerstandsbeiwert gegeben, so daß die auf die Fläche einwirkende Gesamtkraft ermittelt werden kann. In anderen Fällen sind örtliche Beiwerte erforderlich, um die Drücke an verschiedenen Punkten der Flächen zu berechnen. Die Aufbauzeit des Durchschnittsdruckes auf die rückwärtige Fläche hängt von der Größe und in gewissem Maße auch von der Form des Objektes ab.

6.61 Manche Bauten haben zerbrechliche Teile, die bei Auftreffen der Luftdruckwelle leicht ausgeblasen werden und damit die Form des Objektes und die sich ergebende Belastung verändern. Wenn bei einem herkömmlichen Bauwerk die Fenster ausgeblasen werden, so dringt die Luftdruckwelle in das Gebäude ein und gleicht die inneren und äußeren Drücke einander an. Ein Bauwerk kann sogar so konstruiert sein, daß es bestimmte zerbrechliche Teile aufweist, um die Beschädigung aller anderen Gebäudeteile zu verringern. So beeinflußt die Reaktion bestimmter Bauteile in solchen Fällen die Luftdruckbelastung auf das Bauwerk als Ganzes. Im allgemeinen wird nicht angenommen, daß die Bewegung eines Bauteiles die Luftdruckbelastung auf dieses Bauteil selbst beeinflußt. Jedoch ergibt sich eine Ausnahme von dieser Regel, sofern es sich um ein in der Luft fliegendes Flugzeug handelt, das von einer Luftdruckwelle getroffen wird.

Druckbelastung – Zeit-Kurven

6.62 Die Verfahren, nach denen die Kurven für die Druckbelastung als Funktion der Zeit abgeleitet werden können, sind nachstehend angegeben. Die hier aufgeführten Methoden gelten für folgende 4 verhältnismäßig einfache Bauwerksformen: 1. allseitig geschlossene kastenförmige Bauwerke, 2. teilweise offene kastenförmige Bauwerke, 3. offene Gerippebauten, 4. zylindrische Bauwerke. Bei Objekten mit ähnlichen Merkmalen können diese Methoden etwas abgeändert werden. Bei sehr unregelmäßig geformten Objekten ermöglichen diese Verfahren jedoch nur eine rohe Schätzung der zu erwartenden Luftdruckbelastung.

6.63 Die Merkmale der Luftdruckwelle, die bekannt sein müssen, sowie ihre Bezeichnungen sind in Tabelle 6.63 zusammengestellt. Ebenso sind hier die in Kap. III angegebenen Punkte in einer bestimmten Entfernung vom Nullpunkt bei Explosion von gegebener Energieausbeute angeführt.

Tabelle 6.63 Die Merkmale der Luftdruckwelle zur Ermittlung der Belastung

Merkmale	Bezeichnung	Quelle
Überdruckspitze	p	Bild 3.94a und b
Veränderung des Überdrucks mit der Zeit	$p(t)$	Bild 3.82
Dynamischer Spitzendruck	q	Bild 3.95
Veränderung des dynamischen Druckes mit der Zeit	$q(t)$	Bild 3.82
Reflektierter Druck bei normalem Einfall	p_r	Bild 3.80 oder Gleichung 3.81.1
Dauer der positiven Phase	t_+	Bild 3.96
Stoßwellengeschwindigkeit	U	Bild 3.80

Allseitig geschlossene kastenförmige Bauwerke

6.64 Ein allseitig geschlossenes kastenförmiges Bauwerk kann ganz einfach durch einen Quader dargestellt werden (s. Bild 6.64), der die Länge L, die Höhe H und die Breite B hat. Unter diese Kategorie fallen Bauwerke mit Flachdach und Wänden, die ungefähr die gleiche Luftdruckfestigkeit wie das Gerippe haben. Die Wände haben entweder keine Öffnungen (Türen und Fenster) oder nur eine geringe Anzahl solcher Öffnungen, die etwa 5% der Gesamtfläche ausmachen, so daß die Drücke auf das Innere des Bauwerks nahe dem vor dem Stoß vorhandenen umgebenden Wert bleiben, während die Außenseite der Luftdruckbelastung ausgesetzt ist. Um das Verfahren zu vereinfachen, wird – wie oben – angenommen, daß eine Seite des Bauwerks der Explosion zugewandt ist und senkrecht zur Richtung der Ausbreitung der Luftdruckwelle steht. Diese Seite wird als Vorderfläche bezeichnet. Die Belastungsdiagramme sind nachstehend für a) die Vorderfläche, b) die Seite und Decke, c) die rückwärtige Fläche berechnet. Durch Kombination der Ergebnisse für a) und c) erhält man die waagerechte Gesamtlast d).

6.65 *a) Durchschnittsbelastung auf die Vorderfläche.* Zunächst wird der reflektierte Druck p_r ermittelt; dieser ergibt den Druck zum Zeitpunkt $t = 0$, wenn die Stoßwellenfront die Vorderfläche trifft (s. Bild 6.65). Dann wird die Zeit t_s berechnet, in welcher der Ruhedruck p_s zuerst erreicht wird. In Laboruntersuchungen hat man festgestellt, daß t_s in guter Annäherung dargestellt werden kann durch

$$t_s = \frac{3\,S}{U},$$

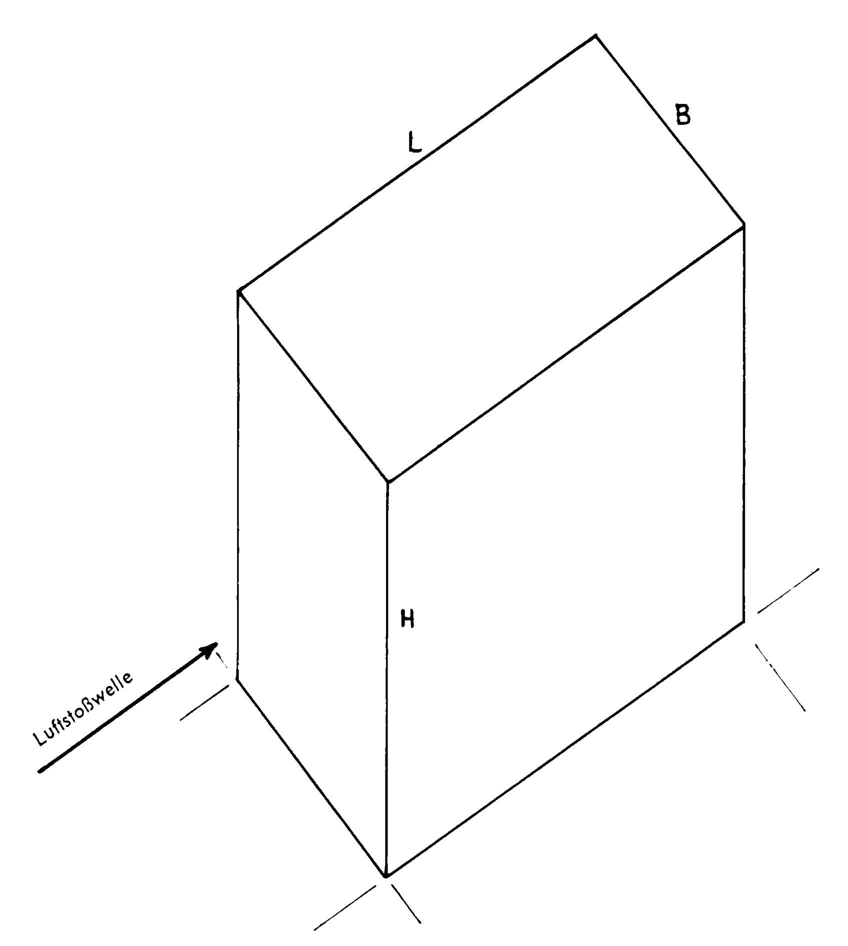


Bild 6.64 Allseitig geschlossenes kastenförmiges Bauwerk

wobei $S = H$ oder $^1/_2\, B$ ist, je nachdem, welcher Wert der geringere ist. Der Widerstandsbeiwert für die Vorderfläche ist eins, so daß der Winddruck hier gleich dem dynamischen Druck ist. Der Ruhedruck ist dann

$$p_s = p(t_s) + q(t_s),$$

wobei $p(t_s)$ und $q(t_s)$ Überdruck und dynamischer Druck zur Zeit t_s sind. Dann klingt der Druck mit der Zeit ab, so daß

$$\text{zur Zeit } t \text{ der Druck} = p(t) + q(t)$$

ist, wobei t irgendein Zeitpunkt zwischen t_s und t_+ ist. Die Druck-Zeit-Kurve für die Vorderfläche kann danach ermittelt werden, wie in Bild 6.65 angegeben.

6.66 *b) Durchschnittsbelastung auf Seiten und Decke.* Obwohl die Belastung unmittelbar nachdem die Luftdruckwelle auf die Vorderfläche auftrifft, beginnt, d. h. bei $t = 0$, werden die Seiten und die Decke nicht voll belastet, bis die Welle die Entfernung L zurückgelegt hat, d. h. bei Zeit $t = L/U$. Der Durchschnittsdruck p_a zu diesem Zeitpunkt wird als Überdruck plus Winddrucklast bei Entfernung $L/2$ von der Vorderseite des Bauwerks betrachtet, so daß

$$p_a = p\left(\frac{L}{2U}\right) - \frac{q}{2}\left(\frac{L}{2U}\right) \text{ ist,}$$

wobei der Widerstandsbeiwert an den Seiten und der Decke des Bauwerks — 1/2 ist. Demnach steigt die Belastung von null bei Zeit $t = 0$ auf den Wert p_a bei Zeit L/U

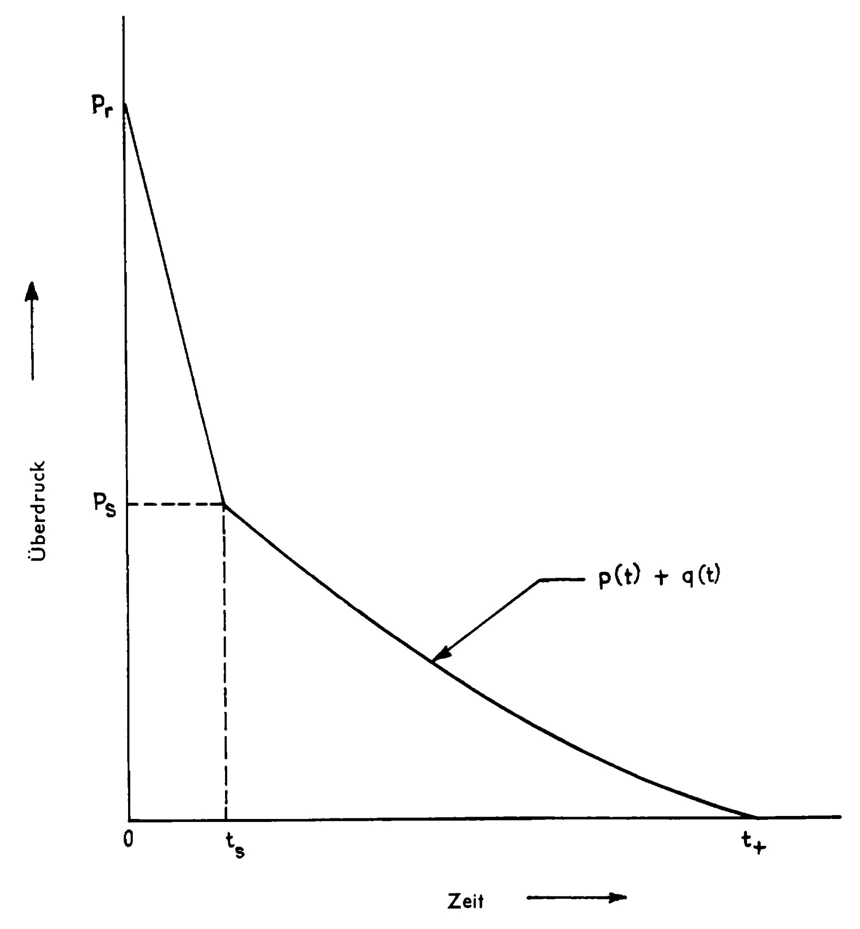


Bild 6.65 Durchschnittsbelastung der Vorderseite eines allseitig geschlossenen kastenförmigen Bauwerks.

an, wie in Bild 6.66 dargestellt. Nach dieser Zeit beträgt der Druck zu irgendeiner Zeit t:

$$\text{Druck (bei Zeit } t) = p\left(t - \frac{L}{2U}\right) - \frac{q}{2}\left(t - \frac{L}{2U}\right),$$

wobei t zwischen L/U und $t_+ + L/2U$ liegt, wie in Bild 6.66 dargestellt. Der Überdruck bzw. der dynamische Druck sind die Werte bei Zeit $t - L/2U$.

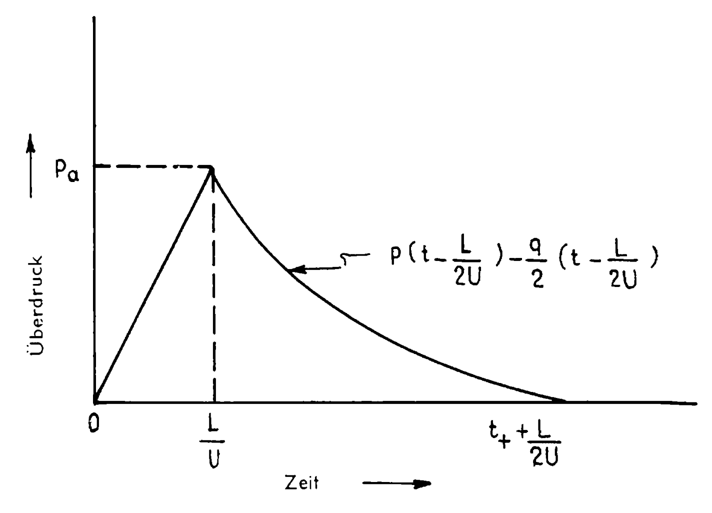


Bild 6.66 *Durchschnittliche Seiten- und Deckenbelastung eines allseitig geschlossenen kastenförmigen Bauwerks*

6.67 *c) Durchschnittsbelastung auf die rückwärtige Fläche.* Die Stoßfront kommt zur Zeit L/U an der Rückseite an; der Druck braucht aber eine zusätzliche Zeit $4S/U$, bis er den Wert p_b erreicht hat (Bild 6.67). Auch hier ist $S = H$ oder $^1/_2\, B$, je nachdem, welches der niedrigere Wert ist. Der Widerstandsbeiwert an der Rückseite ist $-^1/_2$; deshalb wird der Druck zu irgendeinem Zeitpunkt, nachdem p_b erreicht ist, dargestellt durch

$$\text{Druck (zur Zeit } t) = p\left(t - \frac{L}{U}\right) - \frac{q}{2}\left(t - \frac{L}{U}\right),$$

wobei t zwischen $(L + 4S)/U$ und $t_+ + L/U$ liegt, wie in Bild 6.67 gezeigt.

6.68 *d) Waagerechte Gesamtlast.* Die Gesamtlast ist gleich der Vorderseitenbelastung abzüglich der Rückseitenbelastung. Diese Subtraktion wird am besten graphisch dargestellt, wie in Bild 6.68 gezeigt. Das linke Diagramm zeigt die einzelnen Kurven

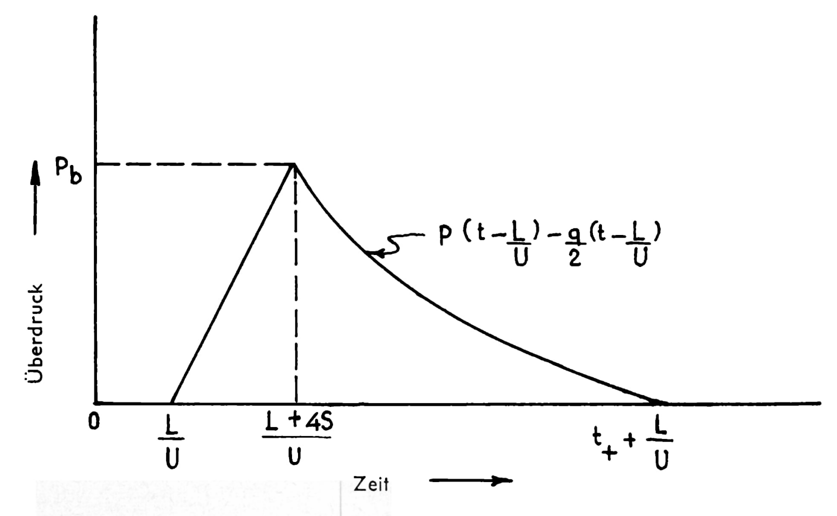


Bild 6.67 *Durchschnittliche Rückseiten-Belastung eines allseitig geschlossenen kastenförmigen Bauwerks*

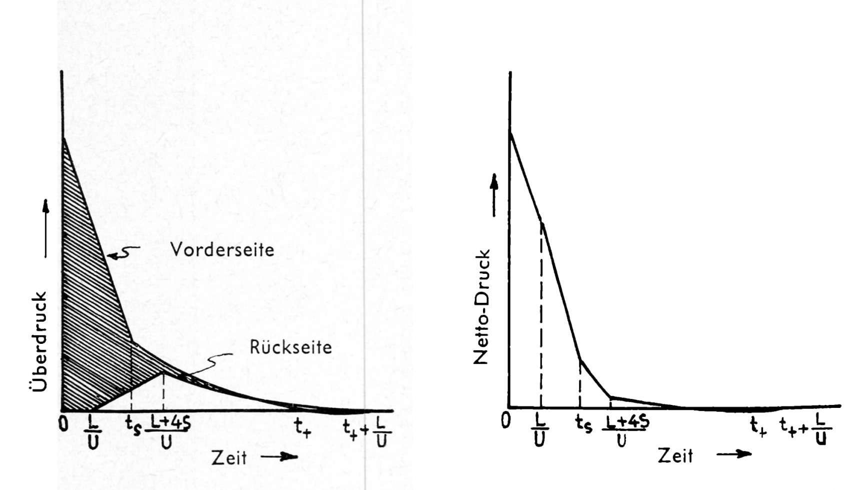


Bild 6.68 *Waagerechte Gesamtlast auf ein allseitig geschlossenes kastenförmiges Bauwerk*

für die Vorder- und Rückseitenbelastungen, wie sie aus Bild 6.65 bzw. 6.67 abgeleitet werden können. Die durch den schraffierten Teil dargestellte Fläche wird dann auf das rechte Diagramm übertragen und ergibt die Gesamtbelastung. Die Gesamtlast wird zur Ermittlung der Geripperaktion benötigt, wogegen die Reaktion der Wände hauptsächlich durch die Belastungen der einzelnen Flächen bestimmt wird.

Teilweise offene kastenförmige Bauwerke

6.69 Bei einem solchen Bauwerk haben die Vorder- und Rückwände etwa 30% Öffnungen oder Fensterflächen. Wie im vorigen Falle wird die Belastung berechnet für a) die Vorderfläche, b) die Seiten und Decke, c) die rückwärtige Fläche, d) die waagerechte Gesamtlast. Da die Luftdruckwelle jetzt in das Innere des Bauwerks eindringen kann, müssen die Kurven für Belastung und Zeit sowohl für das Äußere als auch für das Innere des Bauwerks betrachtet werden.

6.70 *a) Durchschnittsbelastung auf die Vorderfläche.* Die äußere Belastung wird genauso berechnet wie bei einem allseitig geschlossenen Bauwerk, nur wird S durch S' ersetzt. Die Größe S' ist die durchschnittliche Entfernung (der ganzen Vorderfläche) von der Mitte eines Wandteils bis zu einer offenen Kante der Wand. Sie stellt die durchschnittliche Entfernung dar, welche die Verdünnungswellen auf der Vorderfläche zurücklegen müssen, um die reflektierten Drücke auf den Ruhedruck zu reduzieren.

6.71 Der Druck auf die Innenseite der Vorderfläche beginnt zur Zeit null an zu steigen, weil die Luftdruckwelle unmittelbar durch die Öffnungen eindringt, er braucht aber die Zeit $2L/U$, um den Wert des Luftstoßwellen-Überdruckes zu erreichen. Danach ist der innere Druck zu einem beliebigen Zeitpunkt t durch $p(t)$ gegeben. Die dynamischen Drücke auf das Innere des Bauwerks werden als un-

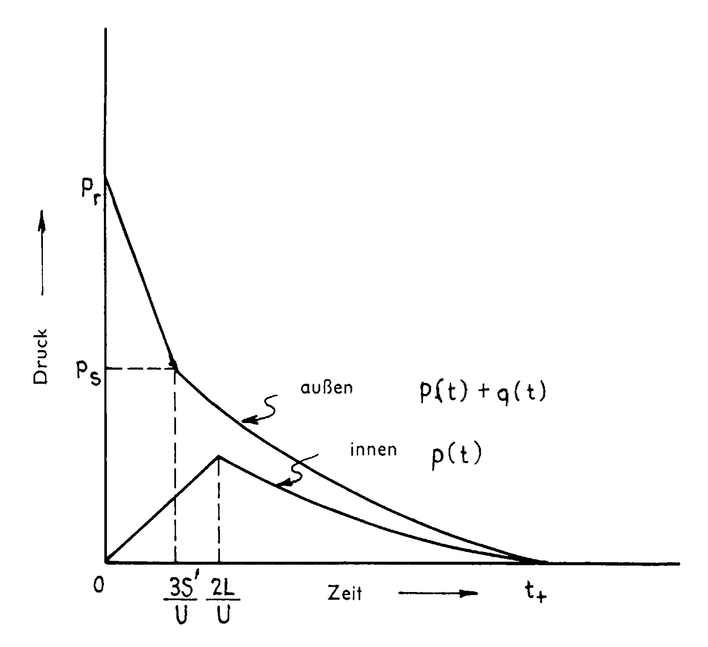


Bild 6.71 Durchschnittliche Vorderseitenbelastung eines teilweise offenen kastenförmigen Bauwerks

bedeutend angesehen. Die Veränderungen des inneren und des äußeren Druckes im Verhältnis zur Zeit sind in Bild 6.71 dargestellt.

6.72 *b) Durchschnittsbelastung auf Seiten und Decke.* Die äußeren Drücke werden wie bei geschlossenen Bauwerken ermittelt, aber die inneren Drücke, z. B. für die Vorderfläche, erfordern eine Zeit $2L/U$, um den Überdruck in der Luftstoßwelle zu erreichen. Auch hier sind die dynamischen Drücke auf das Innere unbedeutend, und die Seitenwandöffnungen bleiben unbeachtet, weil ihre Wirkung auf die Belastung unbestimmt ist. Die Belastungskurven sind in Bild 6.72 dargestellt.

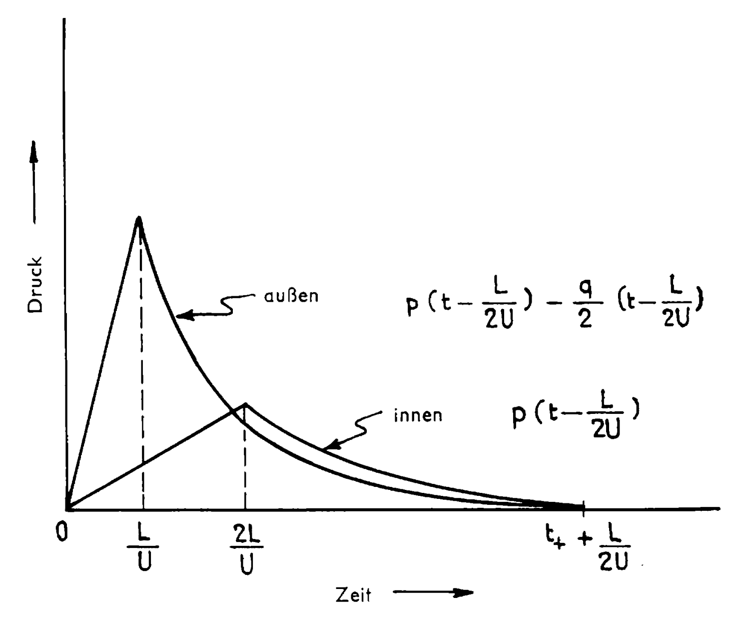


Bild 6.72 Durchschnittliche Seiten- und Deckenbelastung eines teilweise offenen kastenförmigen Bauwerks

6.73 *c) Durchschnittsbelastung auf die rückwärtige Fläche.* Die äußeren Drücke sind die gleichen wie bei einem geschlossenen Bauwerk, nur wird S durch S' ersetzt (s. o.). Der innere Druck, der durch Reflexion an den inneren rückwärtigen Flächen entsteht, erreicht bei Zeit L/U den gleichen Wert wie der Luftstoßüberdruck und klingt dann als $p(t - L/U)$ ab; wie oben wird der dynamische Druck als unbedeutend angesehen (Bild 6.73). Diese Ergebnisse basieren auf der Annahme, daß keine Zwischenwände vorhanden sind, die den Durchgang der Luftdruckwelle durch das Bauwerk beeinflussen.

6.74 *d) Waagerechte Gesamtlast.* Die waagerechte Gesamtlast ist gleich der vorderen Nettobelastung, d. h. außen minus innen, minus der Nettobelastung der rückwärtigen Fläche.

Offene Gerippebauwerke

6.75 Ein Bauwerk, bei dem kleine Einzelteile einer Luftdruckwelle ausgesetzt sind, z. B. eine Fachwerkbrücke, kann als ein offenes Gerippebauwerk angesehen werden. Stahlgerippe-Bürobauten, bei denen der größte Teil der Wandflächen aus Glas besteht, oder Industriebauten mit Asbest-, Leichtstahl- oder Aluminiumwandteilen werden nach dem ersten Auftreffen der Luftdruckwelle sehr schnell zu offenen Gerippebauten.

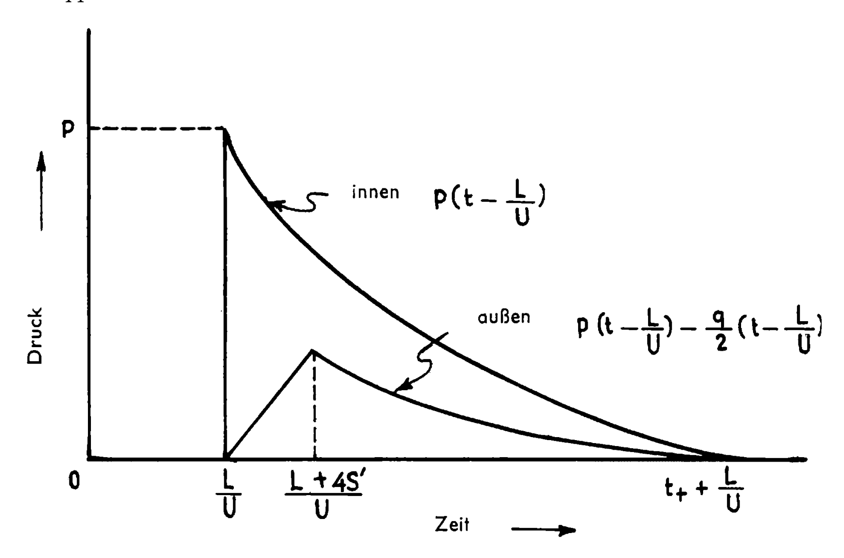


Bild 6.73 Durchschnittliche Rückseitenbelastung eines teilweise offenen kastenförmigen Bauwerks

6.76 Es ist schwierig, den Umfang der Belastung zu ermitteln, die von dem zerbrechlichen Wandmaterial an das Gerippe übertragen wird, bevor der Einsturz erfolgt. Bei Glas wird angenommen, daß die übertragene Belastung unbedeutend ist, wenn sie ausreicht, um Glas zu zerbrechen. Bei Asbest-, Wellblech- oder Aluminiumwandteilen liegt der angenäherte Wert der auf das Gerippe übertragenen Last bei einem Impuls von 0,0028 sec · kg/cm² = 2,8 ms · atü. Je nach Spannweite und Festigkeit der Wandteile werden letztere wahrscheinlich nicht zerstört, wenn die Überdruckspitze unter 0,14 kg/cm² liegt. In diesem Falle wird die volle Luftstoßlast auf das Gerippe übertragen.

6.77 Eine weitere Schwierigkeit bei offenen Gerippebauten ist die Berechnung der Überdruckbelastung auf jedes einzelne Bauteil während des Beugungsprozesses. Da dieser Prozeß bei den einzelnen Bauteilen zu verschiedenen Zeiten erfolgt und durch die Abschirmung des einen Bauteils durch umgebende Bauteile beeinflußt wird, muß das Problem vereinfacht werden. Eine empfehlenswerte Vereinfachung liegt

darin, die Belastung wie einen Impuls zu behandeln, dessen Wert wie folgt zu ermitteln ist: Der Impuls der Überdruckbelastung wird für ein durchschnittliches Bauteil ermittelt, das wie ein geschlossenes Bauwerk behandelt wird, und dies wird mit der Zahl der Bauteile multipliziert. Der sich ergebende Impuls wird so betrachtet, als wäre er zur Zeit des ersten Auftreffens der Stoßfront auf das Bauwerk abgegeben; er kann aber auch in zwei Impulse, nämlich auf die Vorder- und die Rückwände, aufgeteilt werden, wo die Mehrzahl der Bauteile liegt, und dann, wie in Bild 6.79 dargestellt, angewandt werden.

6.78 Der größte Teil der Belastung auf ein offenes Gerippebauwerk besteht aus der Strömungswiderstands-(dynamischen Druck-)Belastung. Bei einem Einzelbauteil im Freien beträgt der Widerstandsbeiwert für I-Balken, U-Profile, Winkel und für Bauteile mit rechteckigem Querschnitt ungefähr 2,0. Da jedoch in einem Fachwerk die einzelnen Bauteile einander in gewissem Maße gegen die volle Luftdruck-

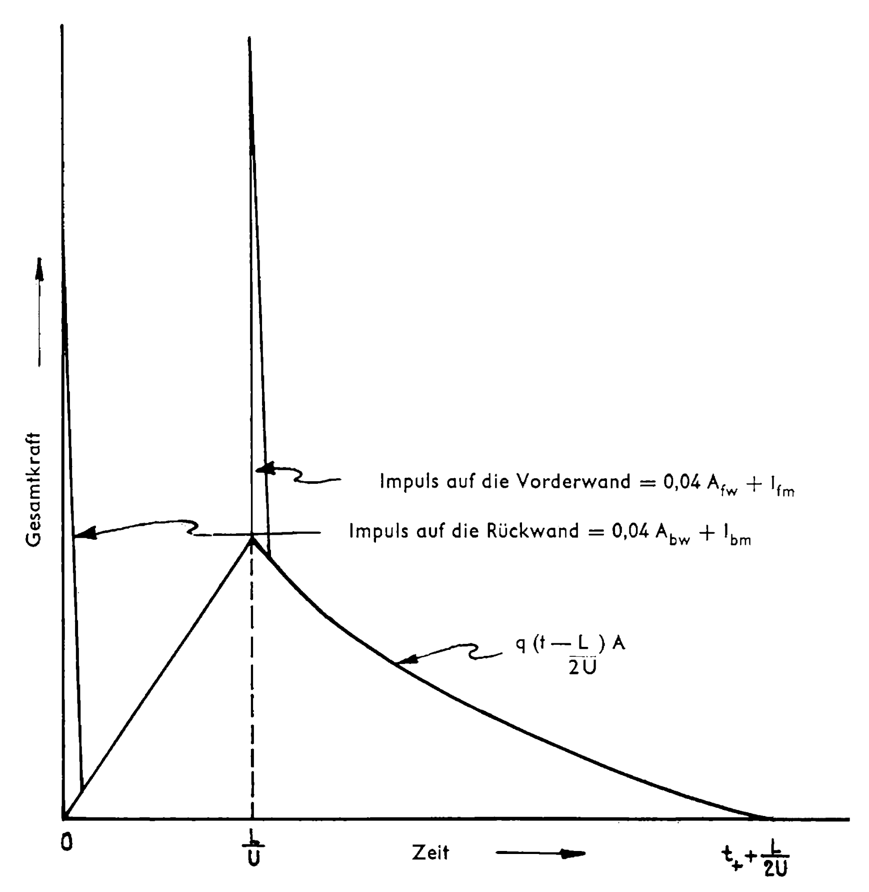


Bild 6.79 Waagerechte Gesamtlast auf ein offenes Gerippebauwerk

belastung abschirmen, wird der durchschnittliche Widerstandsbeiwert auf 1,0 reduziert, wenn es sich um das ganze Gerippe handelt. Die Kraft F, d. h. Druck mal Fläche, auf ein Einzelbauteil ist dann gegeben mit

$$F\,(\text{Bauteil}) = C_d q(t) A_i\,,$$

wobei $C_d = 2{,}0$ und A_i die Bauteilfläche ist, die senkrecht zur Richtung der Luftstoßausbreitung projiziert wird. Für die Belastung auf das Gerippe ist jedoch die Kraft

$$F\,(\text{Gerippe}) = C_{d\,q}(t) \cdot \sum A_i\,,$$

wobei $C_d = 1{,}0$ und $\sum A_i$ die Summe der projizierten Flächen aller Bauteile ist. Das Ergebnis kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$F\,(\text{Gerippe}) = q(t) A,$$

wobei $A = \sum A_i$ ist.

6.79 In Bild 6.79 ist die Last (Kraft) über der Zeit bei einem Gerippe von der Länge L dargestellt, das größere Flächen auf der Vorder- und Rückwand aufweist. Die Bezeichnungen A_{fw} und A_{bw} stellen die Flächen der Vorder- bzw. Rückwände dar, die die Belastungen vor dem Einsturz übertragen; I_{fm} und I_{bm} sind die Impulse der Überdruckbelastung auf die vorderen bzw. die rückwärtigen Bauteile. Wir sehen, daß der Strömungswiderstand nicht seinen vollen Wert $q(L/2U)$ vor der Zeit L/U erreicht, d. h. wenn die Luftdruckwelle das Ende des Bauwerks erreicht.

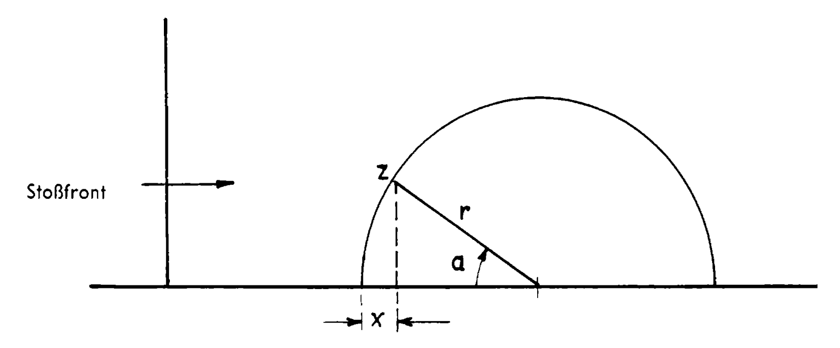


Bild 6.81 Halbzylindrisches Bauwerk

Zylindrische Bauwerke

6.80 Die folgende Überlegung, die auf Überdruckspitzen von weniger als 2,1 kg/cm² beschränkt ist, gilt für Bauwerke mit kreisförmigem Querschnitt, wie z. B. Telefonmasten und Schornsteine. Sie kann auch für Bauwerke mit halbkreisförmigem Querschnitt angewandt werden, z. B. Nissenhütten und – als grobe Annäherung – für gewölbe- oder kugelförmige Bauten.

6.81 Dieser Diskussion ist ein Zylinder zugrunde gelegt, bei dem die Richtung des Luftdruckes senkrecht zur Zylinderachse verläuft. Die Druck-Zeit-Kurven gelten jedoch für halbkreisförmigen Querschnitt, da ein Zylinder aus zwei solchen Halbzylindern mit in beiden Fällen gleicher Belastung besteht. Die Verhältnisse sind dann so, wie in Bild 6.81 dargestellt; r ist der Radius des Zylinders und z stellt einen beliebigen Punkt auf der Oberfläche dar.

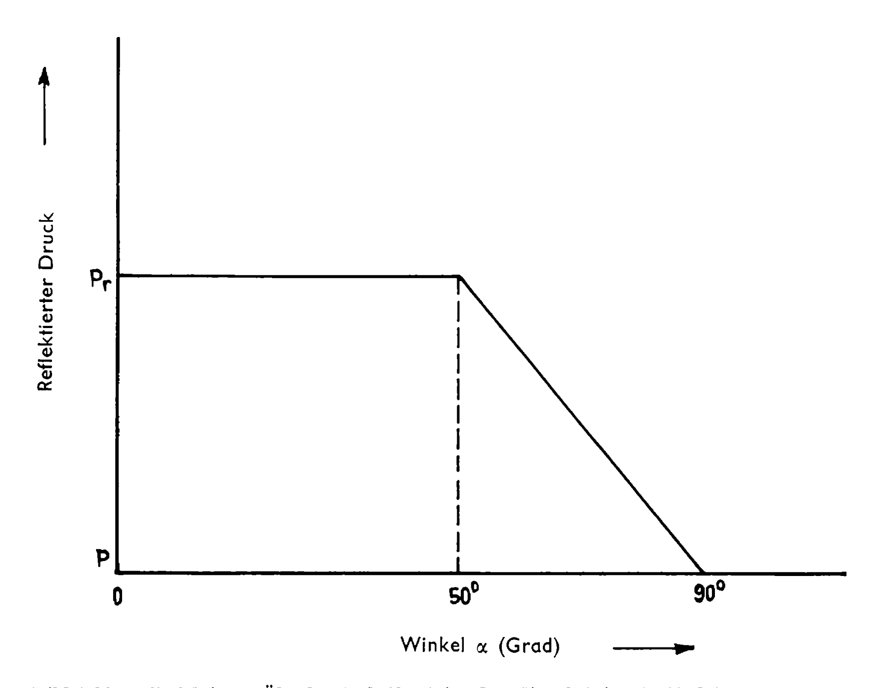


Bild 6.82a Reflektierter Überdruck als Funktion des Winkels bei halbzylindrischem Bauwerk

6.82 Der Reflexionskoeffizient im Punkte z verändert sich mit dem Winkel α; für den vorderen Teil des Bauwerks, d. h. wo α zwischen 0° und 90° liegt, ist die Abhängigkeit des reflektierten Überdruckes von dem Winkel α in Bild 6.82a gegeben. Hier ist p der einfallende Überdruck, p_r ist der reflektierte Überdruck am Fußpunkt, wo nach Bild 3.80 $\alpha = 0°$ ist, und p_{rz} ist der Wert an einem beliebigen Punkt z. Der Widerstandsbeiwert verändert sich ebenfalls mit dem Winkel α, wie in Bild 6.82b dargestellt; hier ist C_{dz} dieser Beiwert an einem beliebigen Punkt z auf der Vorder- oder Rückseite des halbzylindrischen Bauwerks, d. h. bei $\alpha = 0°$ bis 180°.

6.83 Unter Verwendung der bisher verfügbaren Angaben wird nun der Verlauf der Belastung für a) die vordere Hälfte, b) die rückwärtige Hälfte und c) die waagerechte Gesamtlast betrachtet.

6.84 a) Belastung auf die vordere Hälfte ($\alpha = 0°–90°$). – Die Stoßfront trifft zur Zeit $t = 0$ am Fuße des Bauwerks auf, und die Ankunftszeit an einem beliebigen Punkt z auf der vorderen Hälfte ist X/U, wobei

$$X = r(1 - \cos\alpha) \text{ ist,}$$

wie aus Bild 6.81 ersichtlich. Der Wert des reflektierten Druckes (senkrecht zur Oberfläche) an diesem Punkt ist aus Bild 6.82a ersichtlich. Die Abklingzeit t_s ist $3r/U$, wenn $\alpha = 0°$ ist, und sinkt linear auf null ab, wenn $\alpha = 90°$ ist (s. Bild 6.84a). Nach der Zeit t_s ist der Druck (senkrecht zur Oberfläche) zu einem beliebigen Zeitpunkt t:

$$\text{Druck (zur Zeit } t) = p\left(t - \frac{X}{U}\right) + C_{dz}\,q\left(t - \frac{X}{U}\right).$$

Die Druck-Zeit-Kurve an einem beliebigen Punkt z auf der vorderen Hälfte des Bauwerks hat dann die in Bild 6.84b dargestellte Form.

6.85 b) Druck auf die rückwärtige Hälfte ($\alpha = 90°–180°$). – Die Ankunftszeit des Luftstoßes an einem Punkt z auf der rückwärtigen Hälfte ist hier ebenfalls $= X/U$, wobei $X = r(1 - \cos\alpha)$ ist. Aber anstelle des scharf ansteigenden Druckes, wie dies auf der vorderen Hälfte der Fall ist, haben wir hier eine begrenzte Anstiegszeit t_r, die bei null liegt, wenn $\alpha = 90°$ ist, und linear auf $2r/U$ ansteigt, wenn $\alpha = 180°$ ist (s. Bild 6.85a). Der Höchstdruck wird also bei Zeit $X/U + t_r$ erreicht. Danach ist das Absinken des Druckes mit der Zeit:

$$\text{Druck (zur Zeit } t) = p\left(t - \frac{X}{U}\right) + C_{dz}\,q\left(t - \frac{X}{U}\right).$$

Der Verlauf der Belastung, wie er durch den Druck senkrecht zur Oberfläche an einem Punkt z der rückwärtigen Hälfte dargestellt ist, geht aus Bild 6.85b hervor.

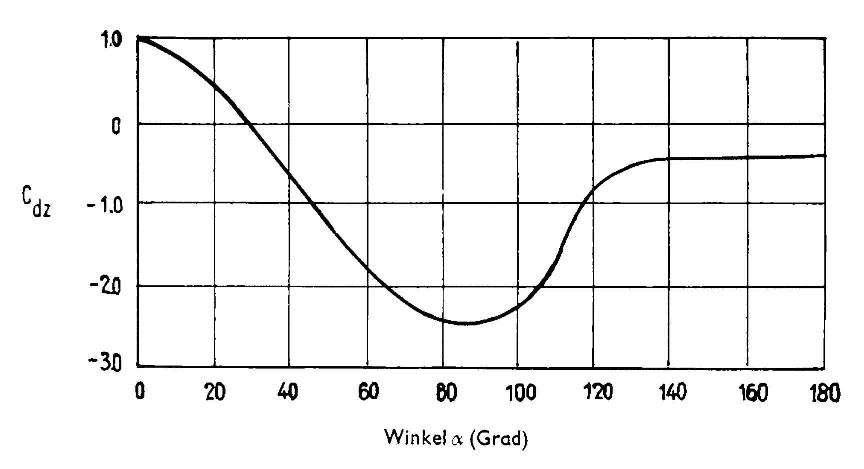


Bild 6.82b Widerstandsbeiwert als Funktion des Winkels bei halbzylindrischem Bauwerk

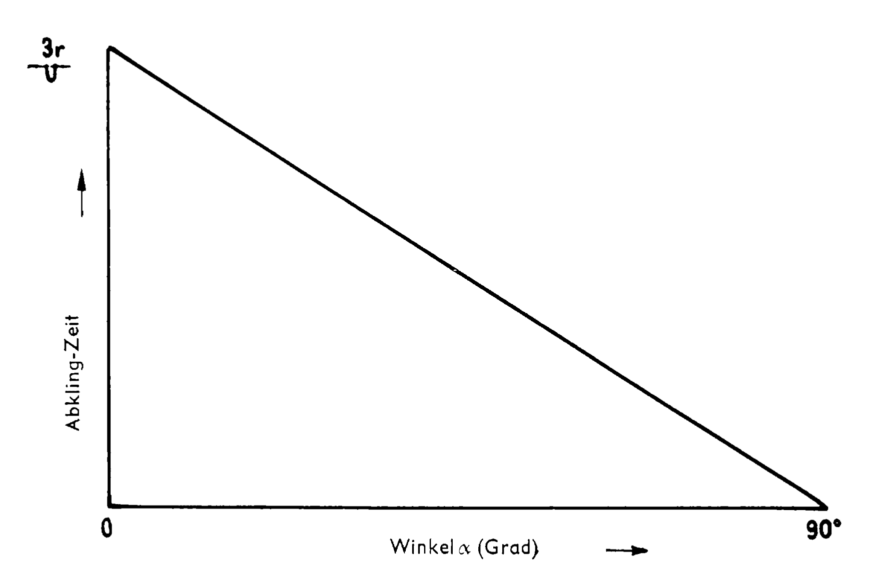


Bild 6.84a Abklingzeit in Abhängigkeit vom Winkel bei halbzylindrischen Bauwerk.

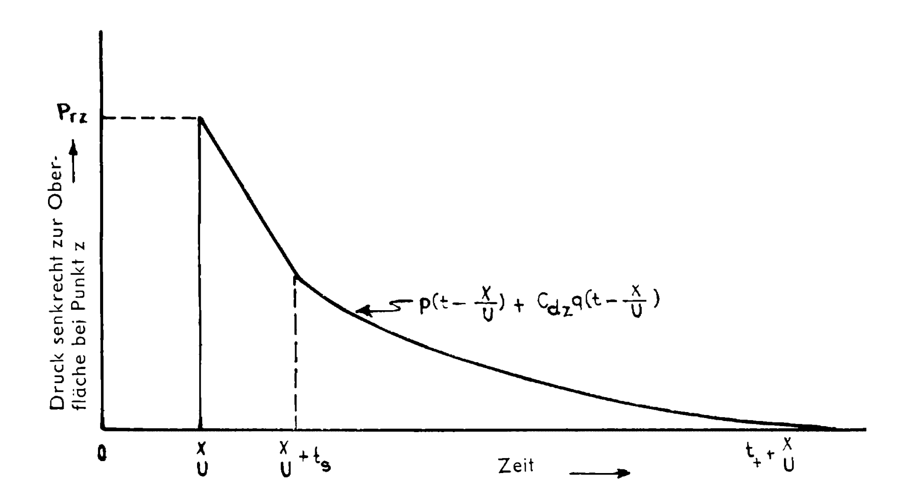


Bild 6.84b Belastung auf einen Punkt der vorderen Hälfte bei halbzylindrischem Bauwerk.

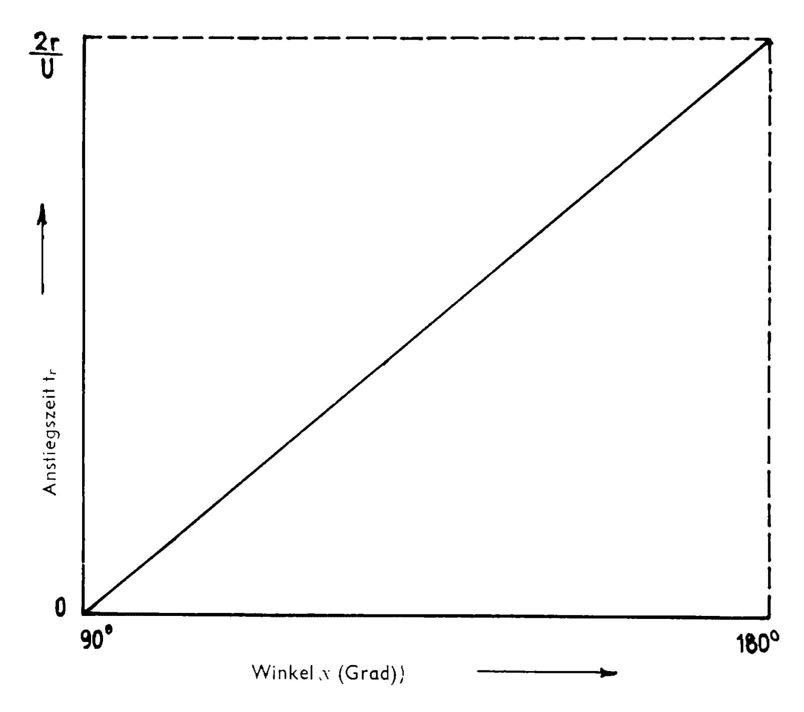


Bild 6.85a Aufbauzeit in Abhängigkeit vom Winkel an der rückwärtigen Hälfte eines halbzylindrischen Bauwerks

6.86 c) waagerechte Gesamtkraft. – Da die vorstehend beschriebenen Verfahren die Belastung senkrecht zur Oberfläche an einem beliebigen Punkt z angeben, wird die waagerechte Gesamtlast nicht durch einfache Subtraktion der rückwärtigen Belastung von der Vorderseitenbelastung ermittelt. Um die waagerechte Gesamtlast zu errechnen, muß man die waagerechten Komponenten der Belastung auf den beiden Flächen addieren und sie dann subtrahieren. In der Praxis kann in solchen Fällen, in denen die waagerechte Gesamtlast als bedeutend angesehen wird, eine Annäherung verwendet werden, um das geforderte Ergebnis zu erlangen. Es wird darauf hingewiesen, daß unter bestimmten Umständen, insbesondere wenn es sich um große Bauwerke handelt, mehr die örtliche als die Gesamtlast das bezeichnende Schadensmerkmal ist.

6.87 Bei dem Annäherungsverfahren zur Ermittlung der Gesamtlast wird die Überdruckbelastung während des Beugungsprozesses als gleich einem Anfangsimpuls von $p_r A 2r/U$ betrachtet, wobei A die projizierte Fläche senkrecht zur Richtung der Luftdruckwelle ist. $2r/U$ ist die Zeit, die die Luftstoßfront benötigt, um das Bauwerk zu passieren. Der Widerstandsbeiwert für einen einzelnen Zylinder beträgt in dem fraglichen Gebiet, d. h. bei Überdrücken von weniger als 2,1 kg/cm²

etwa 0,4. Deshalb kann außer dem Anfangsimpuls der Rest der waagerechten Gesamtlast durch die Kraft $0{,}4 q(t) A$ dargestellt werden, wie aus Bild 6.87 ersichtlich, das sich auf ein einzelnes Bauwerk bezieht. Wenn ein Gerippe (Fachwerk) aus einer Anzahl kreisförmiger Bauteile besteht, dann sind die angewandten Methoden ähnlich wie bei einem offenen Gerippebau (Abschn. 6.78ff.), wobei $C_d = 0{,}2$ ist.

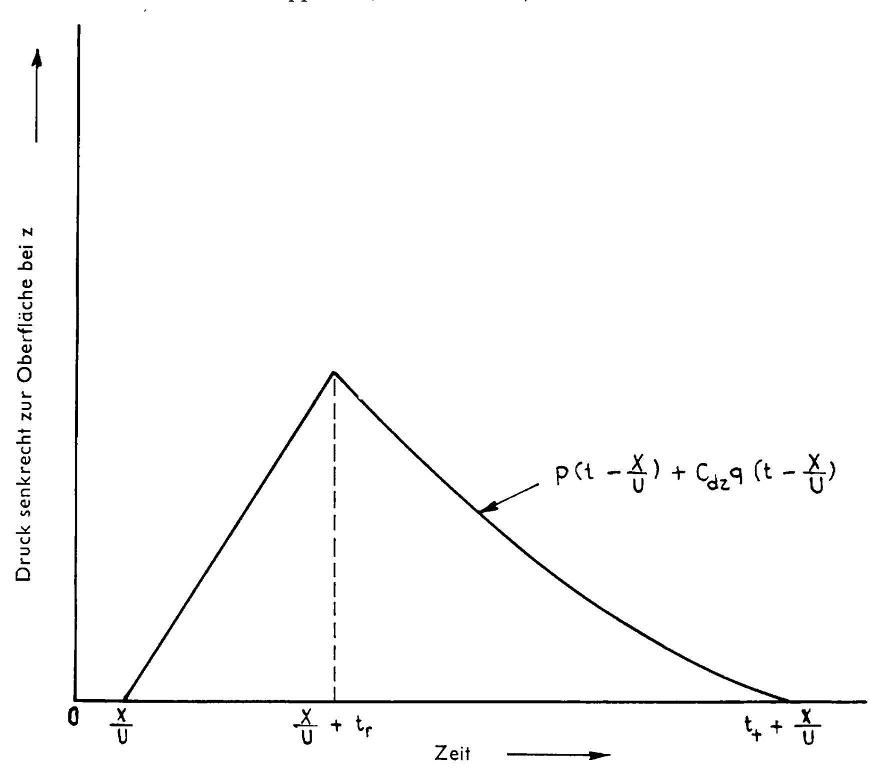


Bild 6.85b *Belastung auf einen Punkt der rückwärtigen Hälfte eines halbzylindrischen Bauwerks.*

Reaktion von Objekten auf Luftdruckbelastung

Schäden an festen und beweglichen Objekten

6.88 Die Reaktion eines Objektes ist die Bewegung oder Durchbiegung, die eintritt, wenn das Objekt einer Belastung ausgesetzt wird (Abschn. 3.46). Bei Objekten, die mit dem Erdboden verankert sind, besteht die Reaktion aus der Bewegung eines Teiles des Bauwerks im Verhältnis zu einem anderen Teil. Bewegliche Objekte können

über den Erdboden gleiten, rollen oder fallen. Bei befestigten Objekten wird eine bleibende Durchbiegung eines Teils gegenüber einem anderen Teil für gewöhnlich als Beschädigung angesehen. Beispiele solcher Schäden an befestigten Objekten sind ausgeblasene Fenster, eingedrückte Dächer und Wände.

6.89 Die Schäden an beweglichen Objekten können ähnlich sein, jedoch kann die Ursache hierfür entweder der direkte Luftstoßdruck sein oder die Art, wie das durch den Luftdruck in Bewegung gesetzte Objekt wieder zur Ruhe kommt. Die Bewegung eines Objektes mag selbst keinen Schaden verursachen, aber es können sich schwere Schäden ergeben, wenn es auf ein anderes Objekt oder auf den Erdboden aufprallt. Die Reaktion eines Fahrzeuges auf Luftdruckbelastungen kann als Beispiel der Beschädigung angesehen werden, die ein bewegliches Objekt erleiden kann. Verhältnismäßig hohe Überdrücke erzeugen nur Oberflächen-Beschädigungen; gleichzeitig verursacht aber der dynamische Druck eine Gesamtbewegung des Fahrzeuges, die ein Umstürzen zur Folge hat. Hierbei erfolgt die Hauptbeschädigung, z. B. verbogenes Fahrgestell und abgeschlagene Räder.

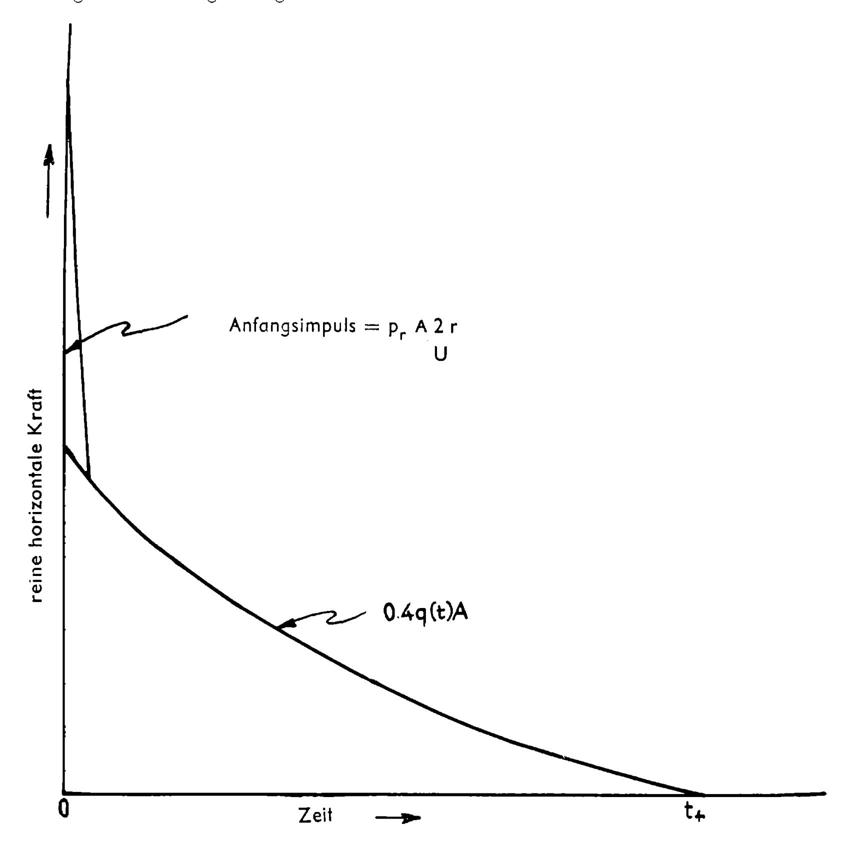


Bild 6.87 Angenäherte gleichwertige waagerechte Gesamtlast auf ein halbzylindrisches Bauwerk

Faktoren, die die Zielreaktion beeinflussen

6.90 In Kap. III waren die Faktoren behandelt, welche die Reaktion eines Objektes auf die Luftdruckbelastung beeinflussen. Hier sind nun weiter die Merkmale eines Zieles behandelt, welche einen größeren Einfluß auf die Reaktion haben; dies sind 1. die Festigkeit oder Widerstandsfähigkeit gegen Durchbiegung, 2. die Verformungsfähigkeit, 3. die Masse des Angriffszieles.

6.91 *Festigkeit oder Widerstandsfähigkeit gegen Durchbiegung.* Das Verhältnis zwischen Widerstandsfähigkeit und Durchbiegung wird nachstehend zu einer Berechnung der baulichen Reaktion auf Luftdruckbelastungen benutzt. Für gewöhnlich wird dieses Verhältnis aus der statischen Belastung ermittelt und so abgeändert, daß die Dehnungsgeschwindigkeit berücksichtigt wird, wenn das Material (oder Objekt) dynamischen Belastungen ausgesetzt wird, wie dies bei einer Kernexplosion der Fall ist. Zu bemerken ist, daß Materialien keine maximale Widerstandsfähigkeit entwickeln, bevor eine begrenzte Durchbiegung eingetreten ist. Jedoch wird die Widerstandsfähigkeit gegen Umkippen eines Objektes, das sich im stabilen Gleichgewicht befindet, im allgemeinen bei einem Maximum beginnen und mit zunehmender Durchbiegung nachlassen.

6.92 Verformungsfähigkeit. – Die Verformungsfähigkeit, d. h. die Fähigkeit von Materialien, sich plastisch zu verformen, ohne zu Bruch zu gehen, wird oft als Fließen bezeichnet, d. h. als Dehnung, bei welcher zuerst eine bleibende Verformung eintritt. Materialien mit geringer Verformungsfähigkeit gehen bei Dehnungen, die nur wenig stärker sind als die Fließgrenze, zu Bruch. Eine starke Verformungsfähigkeit dagegen bedeutet, daß die Dehnung, bei der das Material zu Bruch geht, das 20-, 30- oder Mehrfache der Fließgrenze betragen kann. Da die Verformungsfähigkeit ein Maßstab der Energieabsorptionsfähigkeit eines Materials oder eines Bauwerks ist, stellt sie einen bedeutenden Faktor bei der Widerstandsfähigkeit gegen Luftstoß dar.

6.93 Die Masse des Angriffszieles. – Die Masse des Angriffszieles bestimmt die Trägheit oder die zusätzliche Widerstandsfähigkeit gegen Beschleunigung des Zieles. Bei Luftdrucklasten von starker Intensität und kurzer Dauer ist sie ein bedeutsamer Parameter bei der Reaktionsberechnung. Der Einfluß der Masse wird für gewöhnlich als Schwingungsperioden des Bauwerks ausgedrückt. Je größer die Masse, um so größer ist im allgemeinen der Trägheitswiderstand, und um so länger sind die Schwingungsperioden, vorausgesetzt, daß die sonstigen Verhältnisse mehr oder weniger gleich sind.

Berechnung der baulichen Reaktion

6.94 Nachdem die Belastung auf ein Bauwerk ermittelt worden ist, kann grundsätzlich auch die Reaktion vorausgesagt werden. Aber in vielen Fällen ist dies nicht so einfach, weil umfangreiche mathematische Berechnungen damit verbunden sind. Deshalb ist eine Vereinfachung erforderlich, damit eine solche Berechnung in an-

gemessener Zeit durchgeführt werden kann. Bei einem Bauwerk, bei dem die Verschiebung eines Punktes zur Verschiebung des ganzen Bauwerks in Beziehung gesetzt werden kann, kann die Reaktionsberechnung auf ein verhältnismäßig einfaches Verfahren begrenzt werden. Nimmt man an, daß dieser Punkt sich nur in einer Richtung verschieben kann, dann ist ein Masse-Feder-System von einem Freiheitsgrad anwendbar, um die Reaktion des Bauwerks aus einer einzigen Schwingungsform darzustellen. In der Regel wird der größte Teil der Bewegung durch die Schwingungsform verursacht, die der geringsten (oder Grund-)Schwingungsfrequenz des Bauwerks entspricht.

6.95 Die Hauptannahme bei den nachfolgenden Darstellungen ist deshalb, daß ein System mit einem Freiheitsgrad dem gegebenen Bauwerk ausreichend entspricht. Letzteres kann als Masse-Feder-System behandelt werden, wobei die Säulen des Bauwerks als Federn betrachtet werden, auf denen die Masse des Daches ruht (Bild 6.95a). Bei Annahme eines Freiheitsgrades kann die Masse sich nur in x-Richtung verschieben. Dann wird unter dem Einfluß einer Kraft F, die auf das Dach einwirkt, die Masse um eine Größe X verschoben (Bild 6.95b).

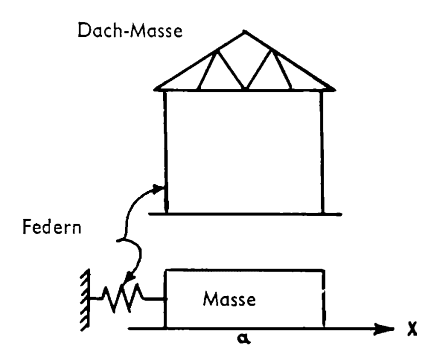


Bild 6.95a Bauwerk als Masse-Feder-System vor der Durchbiegung

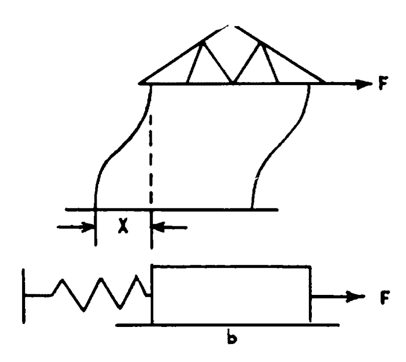


Bild 6.95b Bauwerk als Masse-Feder-System nach der Durchbiegung

6.96 Außer dem Gebäude als Ganzes kann ein Balken oder eine Platte mit nur einer Tragwirkung (in Wirklichkeit ein System von unendlichem Freiheitsgrad) ebenfalls als ein System mit einem Freiheitsgrad dargestellt werden, indem eine Ersatzmasse und -belastung angenommen wird. Diese Betrachtung ist etwas begrenzt, da

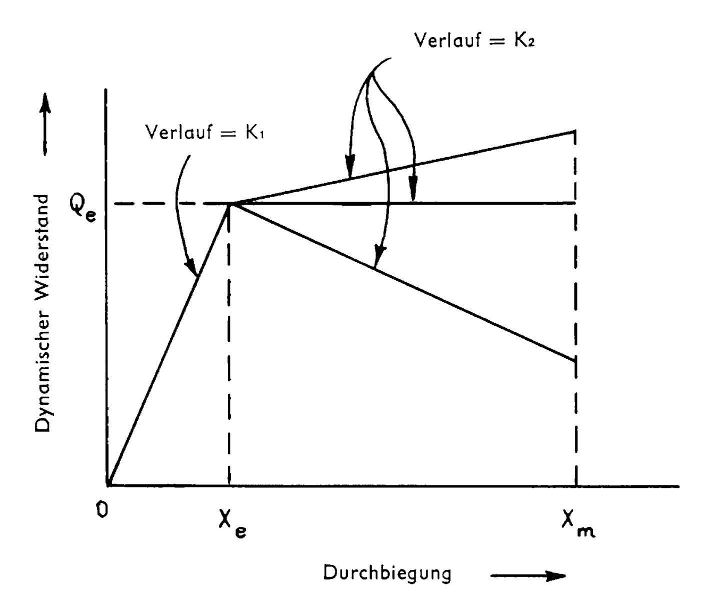


Bild 6.99 Idealisierte Kurven für den dynamischen Widerstand als Funktion der Durchbiegung

die hier dargestellten Methoden nicht direkt für alle Systeme mit vielen Freiheitsgraden, z. B. ein vielstöckiges Gebäude, angewandt werden können.

6.97 Eine weitere Begrenzung stellt die Annahme dar, daß Baustoffe über die Fließgrenze hinaus durchgebogen werden oder – mit anderen Worten – daß im Zusammenhang mit der Reaktion von Bauwerken auf Luftdruckbelastungen nur starke Durchbiegungen von Interesse sind. Deshalb sind die hier dargestellten Methoden nicht für die Berechnung elastischer Durchbiegungen, sondern für ziemlich starke plastische Durchbiegungen gedacht.

6.98 Ein Verfahren ist entwickelt worden für die Berechnung der Durchbiegung, die in einem System mit einem Freiheitsgrad durch eine gegebene Spitzenlast erzeugt wird. Dieses Verfahren kann auch für die Berechnung der Spitzenbelastung angewandt werden, die eine vorgeschriebene Durchbiegung verursacht. Zu diesem Zweck braucht man drei Grunddaten, nämlich

1. die Kurve für den dynamischen Widerstand als Funktion der Durchbiegung des Bauwerks, 2. die Grundschwingung, 3. die Luftdruckbelastung.

Die Kurve für dynamischen Widerstand als Funktion der Durchbiegung

6.99 In Bild 6.99 sind idealisierte Kurven für die Durchbiegung als Funktion des dynamischen Widerstandes eines gewählten Punktes des Bauwerks dargestellt (für gewöhnlich ist dies der Punkt maximaler Durchbiegung), das einer konzentrierten Last an diesem Punkt ausgesetzt ist. Übersteigt die Durchbiegung den Grenzwert X_e, wobei der dynamische Widerstand Q_e ist, dann zeigt die Kurve eine der 3 angegebenen Formen je nach Art des Bauwerks. Der Verlauf der Kurve für den Widerstand als Funktion der Durchbiegung im elastischen Bereich ist durch K_1 dargestellt, während für den plastischen Bereich K_2 gilt. Die maximale Durchbiegung bis zum Versagen (oder die für die Analyse vorgeschriebene Durchbiegung) ist durch X_m dargestellt.

6.100 Bei Bauten aus Stahlbeton oder Stahl wird die Kurve für den dynamischen Widerstand aus der Kurve für den statischen Widerstand als Funktion der Durchbiegung abgeleitet, indem 20% zu den Werten für den dynamischen Widerstand bei X_e und X_m hinzugerechnet werden. d. h. an den Punkten, welche die Durchbiegung bis zum Versagen bzw. die maximale Durchbiegung darstellen. Bei Mauerwerksbauten, Holzbauten oder Metallbauten (außer Stahl) kann die statische Widerstandskurve verwendet werden. Wenn festgestellt wird, daß die genaue Kurve für den statischen Widerstand die gleiche Form hat wie die ganze in Bild 6.100 dargestellte Kurve, dann kann sie durch zwei gestrichelte Linien angenähert werden, wobei die Fläche unter der »angenäherten Kurve« gleich der Fläche unter der »genauen Kurve« ist.

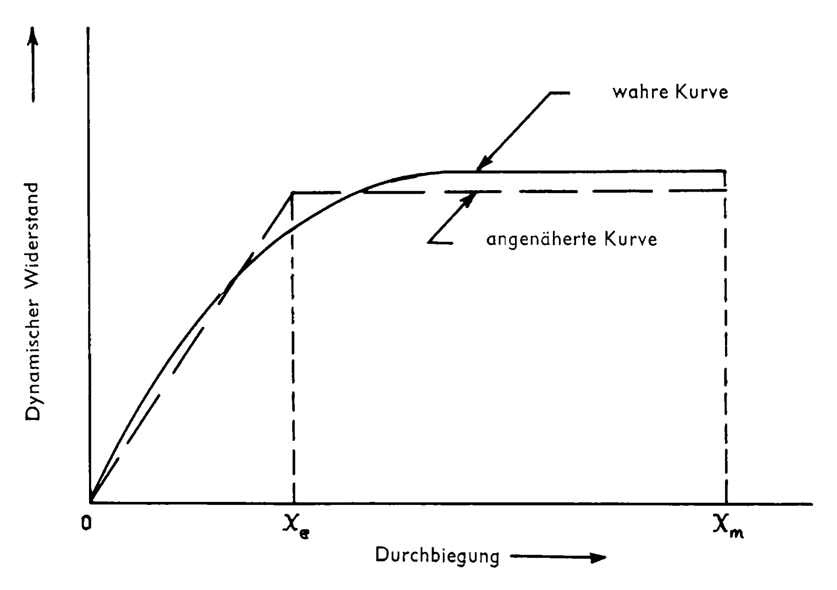


Bild 6.100 Genaue und angenäherte Kurve für den dynamischen Widerstand als Funktion der Durchbiegung

Grundschwingungszeit

6.101 Die Grundschwingung T eines Bauwerks wird ausgedrückt durch die Formel

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_e}{K_1}} \qquad (6.101.1)$$

Hierbei ist K_1 der Verlauf in dem o. a. elastischen Bereich, und M_e ist die Ersatzmasse des Bauwerks. Bei einem Bauwerk, das aus einer Dachmasse besteht, die durch Säulen gestützt ist, wie in Bild 6.95 in einfacher Form dargestellt, kann die Ersatzmasse, die sich an den Säulenspitzen konzentriert, als tatsächliche Dachmasse plus $^1/_2$ der Säulenmasse angenommen werden, vorausgesetzt, daß die Säulen an beiden Enden eingespannt sind. Bei Balken oder Platten mit nur einer Tragwirkung ermittelt man die Ersatzmasse aus der Gesamtmasse, indem man mit dem in Tabelle 6.101 angegebenen entsprechenden Massefaktor multipliziert.

Tabelle 6.101 Masse- und Lastfaktoren

Bauwerk	Massefaktor		Lastfaktor
Einfach gestützter Balken, gleichmäßig verteilte Last	Ersatzmasse in der Mitte des Balkens (1 Freiheitsgrad)	0,50	0,50
Einfach gestützter Balken, Last in der Mitte konzentriert	Ersatzmasse in der Mitte des Balkens (1 Freiheitsgrad)	0,49	1,00
Balken mit eingespannten Enden, gleichmäßig verteilte Last	Ersatzmasse in der Mitte des Balkens (1 Freiheitsgrad)	0,41	0,50
Balken mit eingespannten Enden, Last in der Mitte konzentriert	Ersatzmasse in der Mitte des Balkens (1 Freiheitsgrad)	0,37	1,00
Kragbalken, gleichmäßig verteilte Last	Ersatzmasse am Balkenende (1 Freiheitsgrad)	0,24	0,40
Kragbalken, Last an den Enden konzentriert	Ersatzmasse am Balkenende (1 Freiheitsgrad)	0,26	1,00

Luftstoßbelastung

6.102 Für die hier vorliegenden Zwecke ist die Kurve für die tatsächliche Luftstoßbelastung, wie sie weiter oben in diesem Kapitel entwickelt worden ist, durch eine gleichwertige Kraft-Zeit-Kurve in der in Bild 6.102 dargestellten Form ersetzt worden. Diese besteht aus einem Anfangsimpuls I plus einer linearen Kraft-Zeit-

Belastungs-Funktion, die auf den Punkt wirkt, an dem die Masse als konzentriert angenommen wird. Die Anfangs-(oder Spitzen-)Kraft ist F, und t_1 ist die Dauer der linearen Ersatzlast, wie in dem Bild angegeben. Die Spitzenkraft in dem Dreiecks-diagramm in Bild 6.102 ist die gleiche wie die Spitzenkraft in dem errechneten Diagramm bei verteilter Belastung, und die Dreiecksfläche muß die gleiche sein wie in der Kurve für die tatsächliche Belastung (Kraft-Zeit-Kurve). Bei Balken und Platten mit nur einer Tragwirkung ist F gleich der Spitzenkraft, multipliziert mit dem entsprechenden Lastfaktor aus Tabelle 6.101.

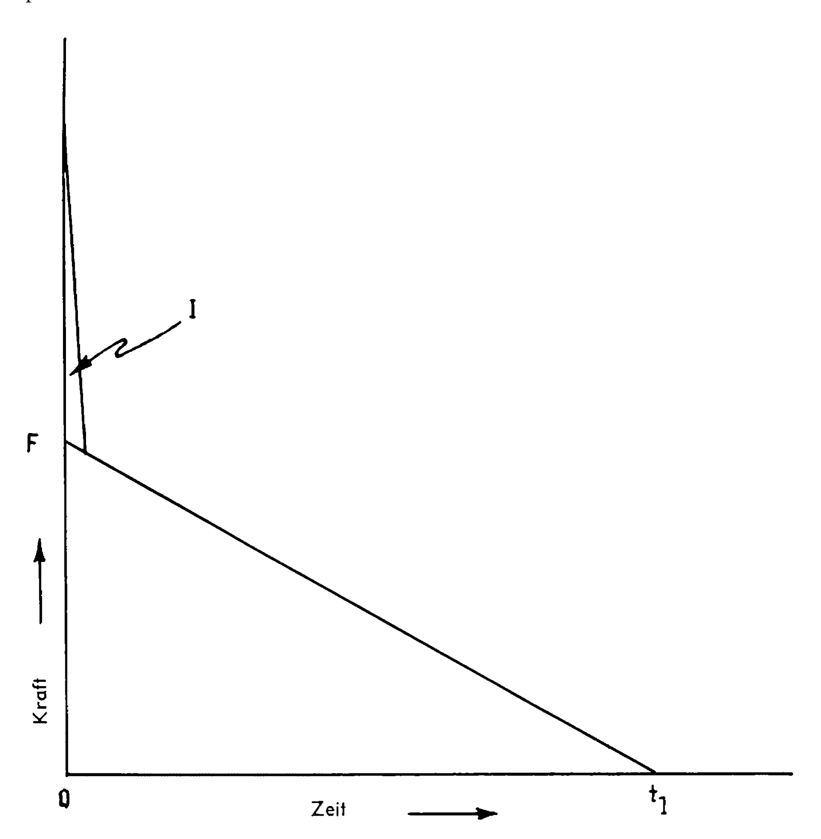


Bild 6.102 Diagramm für dreieckförmige Kraft-, Zeit- und Impulsbelastungs-Funktion

6.103 Der Wert des Anfangsimpulses wird, wo es angebracht ist, aus den oben angeführten Methoden abgeleitet. In vielen Fällen, z. B. bei großen, allseitig geschlossenen oder teilweise offenen Bauwerken, wird ein Anfangsimpuls nicht berechnet. Bei verhältnismäßig kleinen oder offenen Bauwerken sollte der Wert des Anfangsimpulses ermittelt werden, obwohl es sich herausstellen kann, daß er unbedeutend ist.

6.104 Sowohl der Impuls als auch die lineare Kraft-Funktion müssen umgeändert werden von verteilten Lasten in konzentrierte Lasten an den Punkten, wo die Masse als konzentriert angenommen wird. Wenn die Bauwerksmasse hauptsächlich in der Höhe der Stockwerksgrenzen konzentriert ist, kann die Hälfte der restlichen Säulen- oder Wandmasse zu jedem Stockwerk zugeschlagen werden. Die verteilten Luftstoßlasten können an den Verbindungen als Endreaktionen konzentriert sein, die in der üblichen Weise berechnet werden.

Beziehung zwischen Spitzenkraft und Durchbiegung

6.105 Mit den in der vorstehenden Weise ermittelten Daten gewinnt man die Lösung des Problems der baulichen Reaktion aus der Gleichung

$$\frac{F}{Q_e} = \frac{T}{\pi t_1}\left(\sqrt{A} - \sqrt{D}\right) + \frac{A - D}{2\frac{X_m}{X_e}\left(1 + 0{,}7\frac{T}{t_1}\right)} \qquad (6.105.1)$$

hierbei ist

$$A = 2\frac{X_m}{X_e} - 1 + \frac{K_2}{K_1}\left(\frac{X_m}{X_e} - 1\right)^2$$

und

$$D = \left(\frac{2\pi I}{Q_e T}\right)^2 \text{ oder } D = 0, \text{ wenn } I \text{ nicht berechnet ist.}$$

Zur Erleichterung der Anwendung der Gleichung 6.105.1 sind nachstehend die verschiedenen Formelzeichen, die alle bereits definiert worden sind, zusammen mit ihren üblichen Einheiten aufgeführt:

F = Spitzenkraft in kg (s. Bild 6.102)

t_1 = Dauer der linearen Ersatzlast in Sekunden (s. Bild 6.102)

Q_e = Fließwiderstand in kg (s. Bild 6.99)

T = Grundschwingung in Sekunden (s. Gleichung 6.101.1)

I = Anfangsimpuls in kg/sec (s. Bild 6.79, 6.87 und 6.102)

X_e = Fließdurchbiegung in beliebigen Einheiten (s. Bild 6.99)

X_m = maximale (oder vorgeschriebene) Durchbiegung in den gleichen Einheiten wie X_e (s. Bild 6.99)

K_1 = Anstieg der Kurve dynamischer Widerstand als Funktion der Durchbiegung im elastischen Bereich (s. Bild 6.99)

K_2 = Anstieg der Kurve dynamischer Widerstand als Funktion der Durchbiegung im plastischen Bereich (s. Bild 6.99)

6.106 Zwei Arten von Problemen können mit Hilfe der Gleichung 6.105.1 gelöst werden. Wenn die Last vorgeschrieben ist, z. B. eine gegebene Entfernung von einer Explosion bestimmten Explosionswertes, so daß F als bekannt angesehen werden darf, dann kann die entsprechende Durchbiegung X_m ermittelt werden. Oder es kann, wenn die maximale (oder vorgeschriebene) Durchbiegung gegeben ist, der entsprechende Wert F errechnet werden. In beiden Fällen muß die Lösung durch eine Reihe von Näherungen gewonnen werden.

6.107 Ist die Last angegeben, so daß F und t_1 als bekannt angesehen werden können, dann muß zunächst ein vorläufiger Wert X_m errechnet und dann mittels der Gleichung 6.105.1 nachgeprüft werden. Dann wird ein neuer Wert erprobt usw., bis man eine Übereinstimmung der beiden Seiten erhält. Wenn dagegen festgestellt wird, daß eine bestimmte Durchbiegung X_m den Schadensgrad darstellt, der als zulässig gelten kann oder der nicht überschritten werden darf, dann ist die Berechnung von F etwas schwieriger, da t_1 ebenfalls unbekannt und von F abhängig ist. Deshalb muß eine lineare Funktion für die Veränderung der Kraft mit der Zeit angenommen werden, damit man t_1 erhält. Hiermit wird aus Gleichung 6.105.1 ein angenäherter Wert von F ermittelt und dann die angenommene Funktion überprüft. Dies ermöglicht eine neue Schätzung von t_1; der Prozeß wird wiederholt, bis eine befriedigende Lösung erreicht ist.

6.108 Die Anwendung des vorstehend beschriebenen Verfahrens kann zu Fehlern führen, wenn die Kurve für den dynamischen Widerstand zeigt, daß das Bauwerk instabil ist, d. h. wenn K_2 negativ ist. Die Lösung des Problems der Ermittlung des Wertes von F, der eine Durchbiegung X_m erzeugt, kann dann ergeben, daß bei kleinerem Wert X_m eine größere Kraft F erforderlich ist. Es ist also nötig, diese Möglichkeit zu überprüfen. In den Fällen, in denen K_2 negativ ist, wird F zunächst für einen bestimmten Wert X_m, z. B. 0,60 m, ermittelt; dann wird F für einen etwas kleineren Wert X_m, z. B. 0,55 m neu ermittelt; dieser Wert ist größer als der erstere, nähert sich aber dem Originalwert X_m. Wenn der zweite Wert F größer ist als der erste, müssen die Berechnungen fortgesetzt werden, um den maximalen Wert F, genannt F_m, zu ermitteln, der X_m entspricht. Bei größeren Durchbiegungswerten X_m ist die Kraft F_m noch erforderlich.

KAPITEL VII

Die thermische Strahlung und ihre Wirkungen

Strahlung aus dem Feuerball

Allgemeine Merkmale der thermischen Strahlung

7.1 Einer der bedeutendsten Unterschiede zwischen einem Atomsprengkörper und einem herkömmlichen Sprengkörper (s. Kap. I) liegt darin, daß bei einer Kernexplosion ein großer Teil der Energie in Form von thermischer (oder Wärme-)Strahlung ausgelöst wird. Auf Grund der in einem Atomsprengkörper freigemachten großen Energiemenge je Masseneinheit werden sehr hohe Temperaturen erreicht. Diese können in der Größenordnung von mehreren Millionen Grad liegen, während bei einer TNT-Detonation nur einige Tausend Grad erreicht werden. Infolge der in dem Feuerball herrschenden hohen Temperatur, die der im Mittelpunkt der Sonne ähnlich ist, tritt ein beträchtlicher Teil der Kernenergie als thermische Strahlung auf.

7.2 In bezug auf diese Strahlung gleicht der Feuerball bei einer Kernexplosion in vielen Punkten der Sonne. Die Strahlung besteht in beiden Fällen aus ultravioletten Strahlen von kurzer Wellenlänge, sichtbarem Licht von längerer Wellenlänge und infraroten Strahlen von noch längerer Wellenlänge. Die thermische Strahlung bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit, d. h. mit etwa 300000 km/sec fort, so daß die Zeitspanne zwischen ihrer Emission aus dem Feuerball und ihrer Ankunft an dem einige Kilometer entfernten Ziel völlig unbedeutend ist.

7.3 Die Strahlungen aus dem Feuerball werden genau wie die Sonnenstrahlen auf ihrem Wege durch die Luft abgeschwächt. Die thermische Strahlungsmenge aus einer bestimmten Kernexplosion, die einen gegebenen Punkt erreicht, hängt von der Entfernung von der Explosion und von den herrschenden Luftverhältnissen ab. Genau wie beim Sonnenlicht wird viel von der ultravioletten Strahlung in der Luft absorbiert, so daß die in den in Frage kommenden Entfernungen von einer Kernexplosion empfangene thermische Strahlung hauptsächlich in den Bereichen größerer Wellenlänge, d. h. in den sichtbaren und infraroten Bereichen des Spektrums liegt.

7.4 Von der gesamten Energie der Kernexplosion wird ein Drittel in Form von thermischer Strahlung emittiert. Das bedeutet, daß bei einer Kernexplosion von der Energie jeder Kilotonne etwa $3{,}3 \times 10^{11}$ Kalorien, die ungefähr 400000 Kilowattstunden entsprechen, innerhalb weniger Sekunden (oder darunter) nach der Explosion als thermische Strahlungsenergie frei werden[1]). Diese große Energiemenge hat starke Auswirkungen.

[1]) Die je Kilotonne Kernexplosionsenergie emittierte thermische Strahlungsenergie könnte über 500000 kg Wasser von gewöhnlicher Temperatur vollständig in Dampf verwandeln.

7.5 Obwohl der größte Teil der Zerstörungen bei einer Luftexplosion durch den Luftdruck entsteht, trägt die thermische Strahlung zu dem Gesamtschaden bei, indem sie brennbare Stoffe, z. B. fein verteilte Substanzen oder feine Brennstoffe, wie trokkenes Laub und Zeitungspapier entzündet und damit Gebäude oder Wälder in Brand setzt. Diese Brände können sich in den durch den Luftdruck verursachten Trümmern rasch ausbreiten. Außerdem kann die thermische Strahlung Hautverbrennungen bei ungeschützten Menschen verursachen, die sich in Entfernungen von der Kernexplosion befinden, in denen die Wirkungen des Luftdrucks und der Anfangsstrahlung unbedeutend sind. Dieser Unterschied zwischen dem Schadensbereich der thermischen Strahlung und den anderen genannten Wirkungen wird mit zunehmendem Explosionswert größer. Die Gefahr aus der Rückstandsstrahlung durch den radioaktiven Niederschlag, der bei einer Bodenexplosion auftritt, kann sich über einen größeren Bereich erstrecken als thermische Strahlung von bedeutendem Ausmaß, aber auch die letztere würde die Ursache stärkerer Schäden an Personen sein.

Abschwächung der thermischen Strahlung

7.6 Das Ausmaß der durch die thermische Strahlung oder die Möglichkeit des Entzündens brennbarer Stoffe verursachten Verletzungen oder Schäden hängt großenteils von der Menge thermischer Strahlungsenergie ab, die von einer Flächeneinheit Haut, Stoff oder anderen ungeschützten Materials empfangen wird. Die auf eine gegebene Fläche entfallende Wärmeenergie aus einer bestimmten Explosion wird mit zunehmender Entfernung von der Explosion geringer. Dies beruht

1. auf der Verteilung der Strahlung über eine ständig zunehmende Fläche, wenn die Strahlung sich vom Feuerball fortbewegt,
2. auf der Abschwächung der Strahlung bei ihrer Fortbewegung durch die Luft.

Diese Faktoren werden hier nacheinander erörtert.

7.7 Wenn die Strahlung sich gleichmäßig nach allen Richtungen verteilt, dann entfällt auf jede Flächeneinheit der Oberfläche einer Kugel mit dem Radius D in einer Entfernung D von der Explosion die gleiche Energiemenge. Die Gesamtfläche dieser Kugel beträgt $4\pi D^2$, und wenn E die in der Explosion erzeugte thermische Strahlungsenergie ist, dann ist die in einer Entfernung D empfangene Energie je Flächeneinheit $E/4\pi D^2$, vorausgesetzt, daß keine Abschwächung durch die Atmosphäre eintritt. Dieser Betrag verändert sich im umgekehrten Verhältnis mit dem Quadrat der Entfernung von der Explosion. In einer Entfernung von etwa 3 km von einer gegebenen Explosion beträgt die je Flächeneinheit empfangene Wärmeenergie $^1/_4$ der in der halben Entfernung, also etwa 1,5 km, von der gleichen Explosion empfangenen Energie.

7.8 Um die Menge der tatsächlich die Flächeneinheit erreichenden Wärmeenergie zu errechnen, muß auch die Abschwächung der Strahlung durch die Atmosphäre berücksichtigt werden. Diese Abschwächung beruht auf zwei Hauptursachen, nämlich der Absorption und der Streuung. Die in der Luft vorhandenen Atome und Moleküle sind imstande, gewisse Strahlungen zu absorbieren und damit zu beseitigen. Die Absorption ist sehr bedeutsam für Strahlen von kurzer Wellenlänge (oder ultraviolette Strahlen). Hierbei spielen Sauerstoffmoleküle und Ozon eine bedeutende Rolle. Obwohl der Ozonanteil in der Luft im allgemeinen sehr gering ist, werden doch größere Mengen dieser Substanz durch Einwirkung der Gammastrahlen aus der Kernexplosion auf den Sauerstoff in der Luft erzeugt.

7.9 Durch die Absorption nimmt die Menge der in der thermischen Strahlung vorhandenen ultravioletten Strahlen innerhalb einer geringen Entfernung von der Explosion bedeutend ab. In Entfernungen, in denen die Wirkungen der thermischen Strahlung im Vergleich zu den anderen Wirkungen (Luftdruck und Anfangsstrahlung) bedeutsam sind, ist der Anteil der ultravioletten Strahlung ganz gering.

7.10 Eine Abschwächung durch Streuung, d. h. durch Ablenkung der Strahlen von ihrem ursprünglichen Weg, erfolgt bei Strahlungen aller Wellenlängen. Die Streuung kann durch Moleküle in der Luft, z. B. Wasserstoff und Sauerstoff, verursacht werden. Diese Art der Streuung ist jedoch nicht so bedeutend wie die sich aus der Reflexion und Beugung ergebende Streuung von Lichtstrahlen durch in der Luft vorhandene Teilchen aus Staub, Rauch oder Nebel. Die Ablenkung des Strahlungsweges durch Streuung führt eher zu einer etwas verteilten als zu einer direkten Übertragung der thermischen Strahlung.

Wirkung der atmosphärischen Verhältnisse

7.11 Die Verminderung der thermischen Strahlungsenergie auf Grund der Streuung durch die in der Luft vorhandenen Teilchen hängt von den atmosphärischen Verhältnissen, wie z. B. der Konzentration und Größe der Teilchen sowie von der Wellenlänge der Strahlung ab. Das bedeutet, daß die Strahlungen verschiedener Wellenlängen, nämlich die ultraviolette, die sichtbare und die infrarote Strahlung, eine Energieschwächung verschiedenen Ausmaßes erfahren. Für die meisten praktischen Zwecke jedoch ist es zweckmäßiger und völlig ausreichend, wenn auch weniger genau, eine durchschnittliche Schwächung für alle in der thermischen Strahlung vorhandenen Wellenlängen vorauszusetzen.

7.12 Der Zustand der Atmosphäre hinsichtlich der Streuung wird versinnbildlicht durch die sog. »Sichtweite« oder kurz »die Sicht«. Dies ist die horizontale Entfernung, in welcher man ein großes, dunkles Objekt bei Tageslicht gegen den Horizont sehen kann. Ein ungefähres Bezugsverhältnis zwischen der Sicht und der Klarheit der Atmosphäre ist in Tabelle 7.12 angegeben.

Tabelle 7.12 Sichtweite und Klarheit der Atmosphäre

Atmosphärische Verhältnisse	Sichtweite
außergewöhnlich klar	über 65 km
sehr klar	19–48 km
mäßig klar	10–20 km
leicht dunstig	4–10 km
dunstig	2– 4 km
dichter Dunst oder Nebel	weniger als 2 km

7.13 Früher glaubte man, die Menge der empfangenen thermischen Strahlung je Flächeneinheit ungeschützten Materials in bestimmter Entfernung von einer Kernexplosion hinge weitgehend von der atmosphärischen Sicht ab. Es scheint jedoch, daß dies innerhalb weit gezogener Grenzen nicht der Fall ist. Es wird angenommen, daß die Schwächung mit zunehmender Entfernung von der Explosion ständig zunimmt, wenn auch nicht so rasch, wie früher vermutet. Ferner verändert sich in jeder gegebenen Entfernung der Schwächungsgrad bei Sichtweiten von 3–80 km, d. h. bei leicht dunstigen bis außergewöhnlich klaren atmosphärischen Verhältnissen, nicht nennenswert mit der Sicht, vorausgesetzt, daß die Entfernung in der halben Sichtweite oder darunter liegt.

7.14 Der Grund für diese – auf den ersten Blick unerwartete – Wirkung liegt darin, daß die an einem gegebenen Punkt in einer Entfernung von der Kernexplosion empfangene thermische Strahlung aus direkt übertragenen (ungestreuten) und gestreuten Strahlen besteht. Ist die Luft klar und sind sehr wenig fein verteilte Teilchen vorhanden, so ist das Ausmaß der Streuung gering, und es erreicht nur ein geringfügiger Teil der Streustrahlung den Beobachtungspunkt. In diesem Falle ist die empfangene Strahlung im wesentlichen nur die Strahlung, die direkt von dem explodierenden Atomsprengkörper ohne Streuung übertragen worden ist.

7.15 Wenn die Luft eine mittlere Anzahl von Teilchen enthält, dann ist die Menge der direkt übertragenen Strahlung geringer als bei klarer Atmosphäre. Jedoch wird diese Verringerung weitgehend durch Zunahme an Streustrahlung ausgeglichen, die den fraglichen Punkt erreicht. Eine mehrfache Streuung, d. h. eine weitere Streuung bereits gestreuter Strahlung, die bei starker Teilchenkonzentration sehr wahrscheinlich ist, führt oft zu einer Rückkehr der Strahlung zu ihrer ursprünglichen Richtung.

7.16 Der Ausgleich auf Grund mehrfacher Streuung ist deshalb der Grund dafür, daß die Gesamtmenge an Energie aus einer Kernexplosion, die auf eine Flächeneinheit in gegebener Entfernung entfällt, innerhalb bestimmter Grenzen nicht so sehr von der Sichtweite abhängt. Zu bemerken ist, daß diese Schlußfolgerung nur dann gilt, wenn die Atmosphäre einigermaßen klar ist, d. h. wenn kein Regen, Nebel oder dichter Industriedunst vorhanden ist. Bei diesen besonderen Verhältnissen jedoch entgeht nur ein geringer Teil der thermischen Strahlung der Streuung. Dann kann der beträchtliche Verlust an direkt übertragener Strahlung nicht durch mehr-

fache Streuung ausgeglichen werden. Infolgedessen verringert sich die in bestimmter Entfernung von der Explosion aufgenommene Strahlungsenergie. Ein weiterer Ausnahmefall, der nachstehend erörtert wird, liegt vor, wenn die Explosion unter einer Wolkenschicht erfolgt.

7.17 Auch auf die Begrenzung in bezug auf die am Schluß des Abschn. 7.13 erwähnte Entfernung sollte aufmerksam gemacht werden, wonach die Schwächung der thermischen Strahlung nur dann von den atmosphärischen Verhältnissen unabhängig ist, wenn die Entfernung von der Explosion weniger als die halbe Sichtweite beträgt. Bei größeren Entfernungen geht mehr von der Strahlungsenergie verloren, wenn die atmosphärische Sicht geringer wird. In diesem Falle führt die Annahme, daß die Energieabnahme von der Sicht unabhängig ist, zu überhöhten Schätzungen der Wärmeenergie. Vom Standpunkt des Schutzes gesehen, sind diese Schätzungen solchen vorzuziehen, die zu niedrig angesetzt und damit unrichtig sind.

Wirkung von Rauch und Nebel

7.18 Wenn eine Luftexplosion über einer Schicht dicker Wolken, Rauch oder Nebel stattfindet, dann wird ein beträchtlicher Teil der thermischen Strahlung von dem oberen Teil dieser Schicht aufwärts gestreut. Diese Streustrahlung kann in bezug auf einen Punkt am Boden als verloren angesehen werden. Außerdem wird der größte Teil der die Schicht durchdringenden Strahlung gestreut, und nur ein geringer Teil erreicht den gegebenen Punkt in direkter Übertragung. Diese beiden Wirkungen ergeben eine wesentliche Minderung der Wärmeenergiemenge, die ein durch Nebel oder Rauch verdecktes Ziel am Erdboden bei einer Kernexplosion über der Nebel- oder Rauchschicht erreicht.

7.19 Künstlich (chemisch) weißer Rauch wirkt genau wie Nebel in bezug auf die Schwächung der thermischen Strahlung. Eine dichte Rauchwand zwischen dem Explosionspunkt und einem gegebenen Ziel kann die thermische Strahlungsenergie bis auf ein Zehntel der Menge verringern, die sonst am Ziel empfangen würde. Daher scheint eine Rauchwand Schutzmöglichkeiten gegen thermische Strahlung aus einer Kernexplosion zu schaffen.

7.20 Es ist wichtig festzustellen, daß die Verringerung der thermischen Strahlung durch Nebel und Rauch nur dann erreicht wird, wenn der Explosionspunkt über oder nur wenig innerhalb der Nebel- (oder ähnlichen)Schicht liegt. Erfolgt die Explosion in ziemlich klarer Luft unter einer Wolken- oder Nebelschicht, dann wird ein Teil der Strahlung, der normalerweise nach außen in den Raum vordringen würde, zur Erde zurückgestreut. Dadurch wird die empfangene Wärmeenergiemenge größer als bei gleichen atmosphärischen Übertragungsverhältnissen ohne Wolken- oder Nebeldecke.

Wirkung der Abschirmung

7.21 Die thermische Strahlung aus einer Kernexplosion bewegt sich, wenn sie nicht gestreut wird, im allgemeinen wie gewöhnliches Licht geradlinig von ihrer Quelle, dem Feuerball, fort. Dann wirkt jedes feste, lichtundurchlässige Material, z. B. eine Mauer, ein Hügel oder ein Baum zwischen einem gegebenen Objekt und dem Feuerball als Abschirmung und schafft einen Schutz gegen die thermische Strahlung. Einige Beispiele der Abschirmung, von denen viele nach den Kernexplosionen in Japan beobachtet wurden, sind nachstehend beschrieben. Durchsichtige Materialien dagegen, z. B. Glas oder Kunststoffe, lassen die thermische Strahlung nur leicht abgeschwächt durch.

7.22 Eine Abschirmung, die lediglich zwischen einem gegebenen Ziel und dem Feuerball liegt, das Ziel jedoch nicht umgibt, ist bei dunstigen atmosphärischen Verhältnissen nicht immer voll wirksam. Ein großer Teil der empfangenen thermischen Strahlung wird – insbesondere in größeren Entfernungen von der Explosion – gestreut und erreicht das Ziel aus allen Richtungen, nicht nur aus der Richtung des Explosionspunktes. Diese Möglichkeit sollte im Zusammenhang mit dem Problem der Abschirmung gegen die thermische Strahlung nicht außer acht gelassen werden.

Art der Explosion

7.23 Die vorstehenden Ausführungen bezogen sich hauptsächlich auf die thermische Strahlung aus einer Luftexplosion. Bei anderen Explosionsarten sind die Gesamtwirkungen die gleichen, obwohl sie verschiedenen Grades sind. Bei einer Explosion an der Erd- oder Wasseroberfläche, wobei der Feuerball die Erde oder das Wasser tatsächlich berührt, ist der als thermische Strahlung in Erscheinung tretende Teil der Explosionsenergie geringer als bei einer Luftexplosion. Dies beruht zum Teil auf der Tatsache, daß ein Teil der thermischen Strahlung durch die Erde (oder das Wasser) absorbiert wird. Auf diese Weise geht mit zunehmender Explosionshöhe weniger Wärmeenergie verloren.

7.24 Eine weitere bedeutsame Tatsache liegt darin, daß bei einer Bodenexplosion der größte Teil der ein gegebenes Ziel am Erdboden erreichenden thermischen Strahlung durch die Luft nahe der Erdoberfläche wandert. In diesem Teil der Atmosphäre erfolgt eine stärkere Absorption durch Moleküle von Wasserdampf und Kohlensäure, und das Ausmaß der Streuung durch Staubteilchen ist größer als in höheren Lagen. Infolgedessen erreicht außer dem geringen Teil der bei einer Bodenexplosion als Wärmeenergie ausgestrahlten Gesamtenergie ein kleinerer Teil dieser Energie das Ziel in einer bestimmten Entfernung von der Explosion. Die Wärmewirkungen bei einer Bodenexplosion sind also bedeutend geringer als bei einer Luftexplosion gleichen Explosionswertes.

7.25 Bei Untererd- bzw. Unterwasserexplosionen wird nahezu die gesamte thermische Strahlung absorbiert, sofern der Feuerball die Erd- oder Wasseroberfläche

nicht nennenswert durchdringt. Die Wärme-(Hitze-)Energie wird dann bei der Verdampfung des Bodens bzw. Wassers verbraucht. Somit treten hierbei die normalen thermischen Strahlenwirkungen, wie sie bei einer Luftexplosion zu beobachten sind, nicht auf.

Wirkungen der thermischen Strahlung

Absorption der thermischen Strahlung

7.26 Wie bereits gesagt, ist der Feuerball auf Grund der bei einer Kernexplosion erreichten Temperaturen der Sonne insoweit ähnlich, als eine große Energiemenge als thermische Strahlung emittiert wird. Bei herkömmlichen Sprengkörpern ist nicht nur der Gesamtexplosionswert viel geringer, sondern auch die Temperaturen sind viel niedriger, so daß der als thermische Strahlung in Erscheinung tretende Teil der Energie sehr viel geringer ist als bei einem Atomsprengkörper. Deshalb sind die Wirkungen der thermischen Strahlung bei einem herkömmlichen Sprengkörper – abgesehen vielleicht von den Bereichen ganz nahe der Explosion – unbedeutend. Dagegen kann insbesondere bei einer Kernexplosion in der Luft die Wärmeenergie selbst in größeren Entfernungen beträchtlich sein. Die mit der thermischen Strahlung verbundenen Erscheinungen, insbesondere Hautverbrennungen und größere Brandwirkungen, sind deshalb bei der Explosion von Atomsprengkörpern neuartig.

7.27 Die Wärmeenergiemenge, die auf eine der Kernexplosion ausgesetzte Flächeneinheit entfällt, hängt ab von dem Explosionswert, der Entfernung von der Explosion und in gewissem Maße auch von dem Zustand der Atmosphäre. Obwohl die thermische Strahlung aus dem Feuerball sich über einen großen Wellenlängenbereich erstreckt, d. h. vom kurzen ultravioletten über den sichtbaren bis zum infraroten Bereich des Spektrums, wird ein großer Teil der ultravioletten Strahlung auf ihrem Wege durch die Atmosphäre absorbiert oder gestreut.

7.28 Von den beiden vom Feuerball ausgesandten thermischen Strahlungen (s. Kap. II) enthält die erstere auf Grund der während dieser Zeit herrschenden sehr hohen Temperaturen einen größeren Teil ultravioletter Strahlen[1]). Jedoch dauert dieser erste Impuls selbst bei Explosionen im Megatonnenbereich nur den Bruchteil einer Sekunde, und die ausgestrahlte Wärmeenergiemenge stellt einen unbedeutenden Bruchteil der Gesamtmenge dar. Bei Entfernungen von der Explosion, in denen die Wirkungen der thermischen Strahlung bedeutend sind, ist der ultraviolette Teil der Strahlung wegen der kurzen Zeit, in der die Oberflächentemperatur des Feuerballes sehr hoch ist, und wegen der starken atmosphärischen Absorption der ultra-

[1]) Es ist aus theoretischen Untersuchungen und experimentellen Messungen bekannt, daß die Wellenlänge bei der maximalen Energiedichte eines idealen (»schwarzer Körper-«) Strahlers – einem solchen gleicht der Feuerball in guter Näherung – mit wachsender Temperatur der Strahlung abnimmt. Bei Temperaturen über 7600° K liegt dieses Maximum im ultravioletten Bereich des Spektrums (s. Abschn. 7.106).

violetten Strahlen gering. Trotzdem können diese Strahlungen, da sie größere biologische Schäden verursachen als sichtbare oder infrarote Strahlen, in manchen Fällen zu Verletzungen durch Wärme beitragen.

7.29 Wenn die thermische Strahlung einen Stoff oder ein Objekt trifft, dann wird ein Teil reflektiert und ein Teil absorbiert; der evtl. verbleibende Rest geht hindurch und trifft schließlich auf weiteres Material. Die von dem Material absorbierte Strahlung verursacht Erwärmung und bestimmt damit die Beschädigung dieses Materials. Die Menge der einfallenden Strahlung, die absorbiert wird, hängt von der Art und Farbe des Materials oder Objektes ab. Stark reflektierende und durchsichtige Stoffe absorbieren nicht viel von der thermischen Strahlung und sind deshalb verhältnismäßig widerstandsfähig gegen ihre Wirkungen. Dünnes Material leitet oft einen großen Teil der einwirkenden Strahlung weiter und entgeht somit größerem Schaden.

7.30 Schwarzer Stoff absorbiert einen viel größeren Teil der einfallenden thermischen Strahlung als der gleiche Stoff in weißer Farbe. Der erstere wird also mehr angegriffen als der letztere. Hellfarbiges Material verkohlt auch nicht so schnell wie ein dunkles Stück aus gleichem Material. Jedoch verhält sich ein Material, das in den Anfangsstadien des Einwirkens der thermischen Strahlung rasch schwarz wird (oder verkohlt), im wesentlichen genau wie schwarzes Material, d. h. es absorbiert stark ungeachtet seiner ursprünglichen Farbe. Dagegen schirmt es, wenn sich Rauch bildet, zum Teil das darunterliegende Material vor der nachfolgenden Strahlung ab.

7.31 Fast die gesamte absorbierte thermische Strahlung wird unmittelbar in Erwärmung umgewandelt. Mit anderen Worten: die Temperatur des absorbierenden Materials steigt an, und diese hohe Temperatur kann Verletzungen oder Schäden, ja sogar eine Entzündung brennbaren Materials verursachen. Wichtig bei der thermischen Strahlung aus einer Kernexplosion ist nicht nur die Tatsache, daß die Energiemenge beträchtlich ist, sondern auch, daß sie in sehr kurzer Zeit ausgestrahlt wird. Das bedeutet, daß die Intensität der Strahlung, d. h. die Geschwindigkeit, mit der sie eine bestimmte Fläche befällt, sehr groß ist. Durch diese große Intensität wird die bei der Absorption der thermischen Strahlung auftretende Erwärmung mit großer Schnelligkeit erzeugt.

7.32 Da nur ein kleiner Teil der Wärme durch Fortleitung in der kurzen Zeit verbraucht wird, in welcher die Strahlung auf das Material trifft, ist die absorbierte Energie – außer bei guten Wärmeleitern, z. B. Metall – großenteils auf eine geringe Materialschicht begrenzt. Dadurch werden an der Materialoberfläche sehr hohe Temperaturen erreicht. Es ist z. B. geschätzt worden, daß bei den Kernexplosionen in Japan, die in einer Höhe von etwa 565 m erfolgten, die Temperatur am Erdboden unmittelbar unter der Explosion wahrscheinlich 3000 bis 4000° C betrug. Zwar fiel die Temperatur mit zunehmender Entfernung von der Explosion rasch ab, jedoch ist anzunehmen, daß sie noch in etwa 1200 m Entfernung über 1600° C betrug (siehe Abschn. 7.83).

7.33 Die bedeutendsten physikalischen Wirkungen der sich aus der Absorption thermischer Strahlung ergebenden hohen Temperaturen sind Hautverbrennungen sowie Versengen, Verkohlen und evtl. sogar Entzündung brennbarer organischer



Bild 7.33 Thermische Strahlung aus einer Kernexplosion entzündete in einem Auto die Polster und brachte das Feuer zur Ausbreitung. Versuchsgelände von Nevada.

Stoffe, z. B. Holz, Gewebe und Papier (Bild 7.33). Dünne oder poröse Materialien, z. B. leichte Stoffe, Zeitungspapier, getrocknetes Gras und Laub sowie verrottetes Holz können in Brand geraten, wenn sie der thermischen Strahlung ausgesetzt werden. Dicke organische Stoffe dagegen, z. B. Holz (von mehr als 1,25 cm Dicke), Kunststoffe und schwere Gewebe verkohlen, brennen jedoch nicht. Es können sich dichter Rauch und sogar Stichflammen entwickeln, aber das Material fördert ein Entzünden nicht.

7.34 Dieses Verhalten ist in den Photographien eines der Fachwerkhäuser zu sehen, welche den Erprobungen in Nevada im Jahre 1953 ausgesetzt wurden. Wie bereits erwähnt (Abschn. 4.12), wurden die Häuser mit einem weißen Außenanstrich versehen, um die thermische Strahlung zu reflektieren und die Brandgefahr zu verringern. Bei der Explosion wurde die Hausfront augenblicklich mit einem dicken, schwarzen Rauch bedeckt (s. Bild 7.34a). Es war jedoch keine Flamme sichtbar. Ganz kurz darauf, aber noch vor Ankunft der Luftdruckwelle, d. h. innerhalb von weniger als 2 Sekunden nach der Explosion, hörte der Rauch auf, wie aus Bild 7.34b ersichtlich. Wahrscheinlich war in der kurzen Wirkungszeit des Strahlungsimpulses die Temperatur nicht hoch genug, um das Holz zu entzünden, da die Wärme zum Teil von der Oberfläche abgeleitet wurde. Wie wir weiter unten sehen werden (Abschn. 7.65), würde dünnes, brennbares Material an der gleichen Stelle wahrscheinlich in Brand geraten sein.

7.35 Die Entzündung von Materialien durch thermische Strahlung hängt von einer Anzahl von Faktoren ab, von denen die wichtigsten – abgesehen von der Art

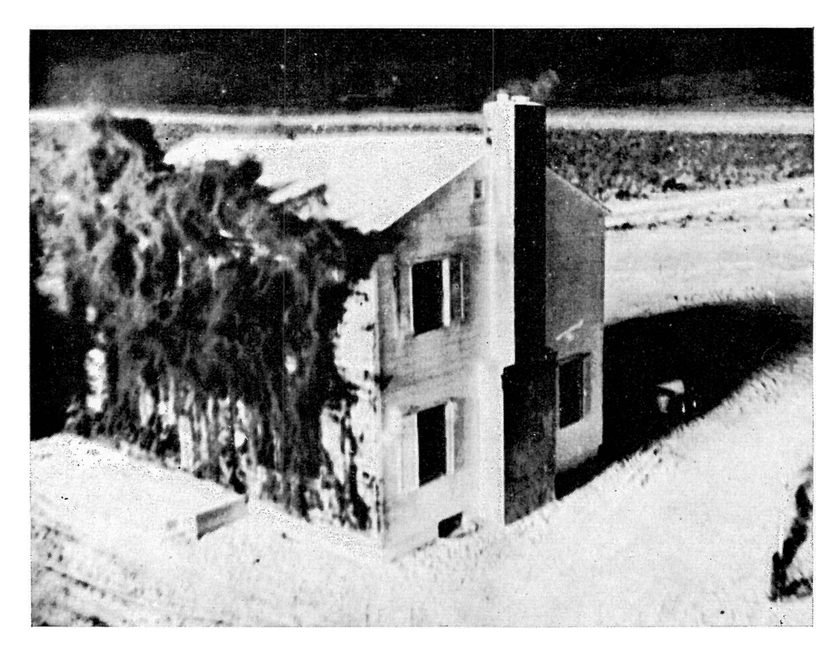


Bild 7.34a Wärmewirkungen auf hölzernes Gerippehaus fast unmittelbar nach der Explosion (etwa 25 cal/cm²)

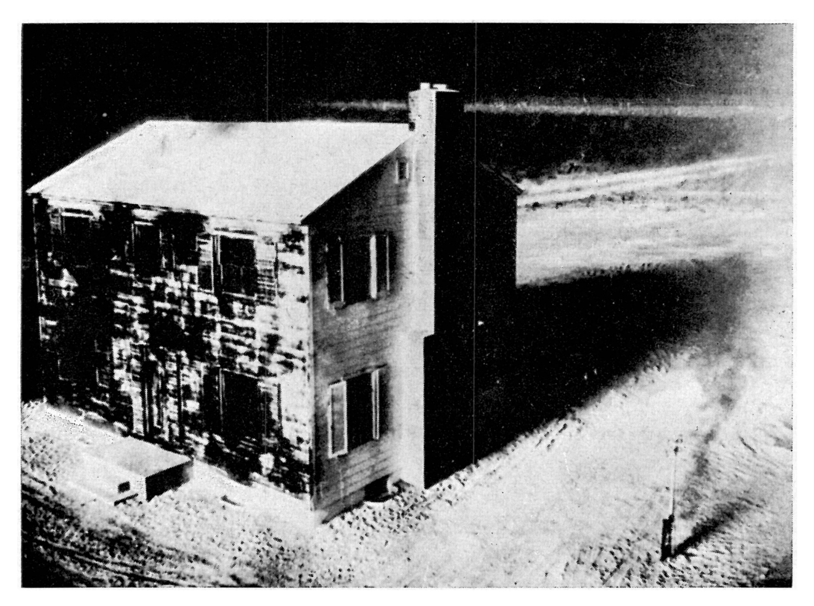


Bild 7.34b Wärmewirkungen auf hölzernes Gerippehaus 2 Sekunden später

des Materials selbst – die Dicke und der Feuchtigkeitsgehalt sind. Ein dünnes Stück eines gegebenen Materials z. B. entzündet sich leichter als ein dickes, und ein trockenes Probestück wird rascher beschädigt als ein feuchtes. Auch die Temperatur kann von Bedeutung sein, denn eine Entzündung ist schwieriger, wenn das Material kalt ist, als wenn es heiß ist.

7.36 Ein bedeutsamer Faktor beim Verkohlen und Entzünden verschiedener Stoffe und bei Hautverbrennungen durch thermische Strahlung ist die Zeit, in welcher die Wärmeenergie empfangen wird. Bei einer gegebenen Gesamtmenge an Wärmeenergie, die je Flächeneinheit ungeschützten Materials empfangen wird, ist der Schaden größer, wenn die Energie rasch abgegeben wird, als wenn sie langsam abgegeben wird. Das bedeutet, daß die gesamte (je Flächeneinheit) empfangene Wärmeenergiemenge, um die gleiche Wärmewirkung an einem gegebenen Material zu erzeugen, bei einer Kernexplosion von hohem Explosionswert größer sein muß als bei einer Explosion von geringerem Explosionswert, da die Energie im ersteren Falle über einen längeren Zeitraum verteilt, d. h. langsamer abgegeben wird.

Hautverbrennungen durch thermische Strahlung

Staffelung der Verbrennungen

7.37 Die thermische Strahlung kann Brandverletzungen entweder direkt, d. h. durch Absorption der Strahlungsenergie durch die Haut, oder indirekt infolge der durch die Strahlung entstandenen Brände verursachen. Die direkten Verbrennungen werden oft »Blitz«-Verbrennungen genannt, da sie durch den thermischen Strahlungsblitz aus dem Feuerball entstehen. Die indirekten (oder sekundären) Verbrennungen werden als »Flammenverbrennungen« bezeichnet; sie gleichen den Hautverbrennungen, die bei großen Bränden jeglichen Ursprungs entstehen oder verursacht werden.

7.38 Ein sehr wesentliches Merkmal einer Kernexplosion ist die sehr große Anzahl von Blitzverbrennungen (s. Abschn. 7.69) infolge der beträchtlichen Emission von thermischer Strahlungsenergie. Auf Grund der sehr raschen Erwärmung der Haut unterscheiden sich die Blitzverbrennungen in ihren physischen und physiologischen Erscheinungen etwas von den bekannteren Flammenverbrennungen. In bezug auf ihre Gesamtwirkungen auf den Körper und in bezug auf ihre Behandlung sind jedoch beide Verbrennungen ähnlicher Art. Sie gleichen auch den auf andere Weise, z. B. durch Berührung mit heißem Metall verursachten Verbrennungen.

7.39 Die Verbrennungen werden ohne Rücksicht auf ihre Ursache im allgemeinen entsprechend ihrem Ausmaß nach dem Grad (oder der Tiefe) der Verletzung gestaffelt. Bei Verbrennungen ersten Grades, für welche leichter Sonnenbrand ein Beispiel ist, tritt nur eine Rötung der Haut auf. Die Heilung erfolgt ohne besondere Behandlung, und es bilden sich auch keine Narben. Verbrennungen zweiten Grades sind

tiefer und gefährlicher; sie sind durch Blasenbildung gekennzeichnet. Starker Sonnenbrand mit Blasenbildung ist ein Beispiel für eine Verbrennung zweiten Grades. Bei Verbrennungen dritten Grades wird die Haut in ihrer ganzen Schicht zerstört. Wenn keine Übertragungen von Hautgewebe erfolgen, bilden sich auf den verletzten Hautflächen Narben.

7.40 Die Einteilung von Verbrennungen in drei Gruppen ist nur bedingt gültig, da es nicht möglich ist, eine genaue Trennung zwischen Verbrennungen ersten und zweiten Grades oder zwischen Verbrennungen zweiten und dritten Grades vorzunehmen. Innerhalb der einzelnen Verbrennungsgrade kann die Verbrennung leicht, mittelmäßig oder schwer sein, so daß es auf den ersten Blick schwierig sein mag, zwischen einer schweren Verbrennung zweiten Grades und einer leichten Verbrennung dritten Grades zu unterscheiden. Eine nachfolgende Untersuchung der Verletzung ermöglicht jedoch im allgemeinen eine genaue Feststellung. In der nachstehenden Abhandlung ist bei dem jeweils genannten Verbrennungsgrad anzunehmen, daß es sich um eine mittlere Verbrennung des betreffenden Grades handelt.

7.41 Die Tiefe der Hautverbrennung ist nicht der einzige Faktor für die Feststellung ihrer Wirkung auf den Menschen. Das Ausmaß der verletzten Hautfläche ist ebenfalls von Bedeutung. So kann eine Verbrennung ersten Grades über den ganzen Körper gefährlicher sein als eine Verbrennung dritten Grades an einer einzigen Stelle. Je größer die verbrannte Hautfläche, um so wahrscheinlicher ist das Auftreten von Symptomen, die den ganzen Körper erfassen. Außerdem gibt es bestimmte kritische örtliche Hautbereiche, z. B. die Hände, wo fast jeder Verbrennungsgrad den Menschen stark behindert.

Energien und Bereiche der Brandverletzung

7.42 Eine Verbrennung ersten Grades über eine große Hautfläche des Körpers kann tödlich wirken, und eine ausgedehnte Verbrennung zweiten Grades macht den Verletzten für gewöhnlich untauglich. Mit anderen Worten: alle Fälle, in denen Personen der thermischen Strahlung einer Kernexplosion innerhalb eines Bereiches ausgesetzt sind, in welchem die empfangene Energie ausreicht, um Blitzverbrennungen mindestens zweiten Grades zu verursachen, sind als Potentialverluste anzusehen. Es werden keine 100%igen Ausfälle eintreten, da viele Personen in gewissem Ausmaße vor der thermischen Strahlung geschützt sein werden, jedoch besteht innerhalb eines bestimmten Raumes die Möglichkeit schwerer Brandverletzungen.

7.43 Um den Bereich möglicher Verluste auf Grund von Wärmeverbrennungen aus einer Kernexplosion zu berechnen, werden 2 Arten von Angaben benötigt: erstens muß man wissen, welche Menge thermischer Strahlungsenergie aus einer Explosion von gegebenem Explosionswert in verschiedenen Entfernungen vom Explosionspunkt (oder Nullpunkt) empfangen wird. Hierfür ist eine Anzahl atmosphärischer und Umweltbedingungen maßgebend.

7.44 Zweitens müssen Unterlagen darüber vorhanden sein, welche Wärmeenergie erforderlich ist, um Verbrennungen verschiedener Art bei verschiedenen Geschwindigkeiten der Energieabgabe, d. h. bei Explosionen verschiedenen Explosionswertes und verschiedener Emissionszeit zu verursachen. Diese Seiten des Problems sind im letzten Teil dieses Kapitels ausführlicher behandelt; fürs erste ist festzustellen, daß die erforderlichen Unterlagen über Luft- und Bodenexplosionen durch Kombination von theoretischen Berechnungen und Versuchsergebnissen aus Laboratorien und bei verschiedenen Kernexplosionsversuchen gewonnen wurden.

7.45 In Tabelle 7.45[1]) ist die ungefähre thermische Strahlungsenergie aufgeführt, die erforderlich ist, um mittlere Verbrennungen ersten, zweiten oder dritten Grades durch die Wirkungen von Kernexplosionen (Luft- oder Bodenexplosionen) mit einem Explosionswert von 1 kt, 100 kt und 10000 kt (10 Megatonnen) zu verursachen. Die Energie ist in Kalorien angegeben, und als Flächeneinheit ist 1 cm^2 gewählt, so daß die Energie in cal/cm^2 Hautfläche angegeben ist. Es sind einige Abweichungen von den angegebenen Energiewerten möglich, da die Hautempfindlichkeit, die Hautfarbe sowie andere Faktoren, die die Schwere der Verbrennung beeinflussen, verschieden sind.

Tabelle 7.45 Ungefähr erforderliche Wärmeenergie zur Erzeugung von Hautverbrennungen bei Luft- oder Bodenexplosionen

Explosionswert	Wärmeenergie (cal/cm^2) Verbrennungen ersten Grades	zweiten Grades	dritten Grades
1 kt	2	4	6
100 kt	$2^1/_2$	$5^1/_2$	8
10 MT	$3^1/_2$	7	11

7.46 Aus Tabelle 7.45 ist ersichtlich, daß die zur Erzeugung von Verbrennungen bestimmten Grades erforderliche Menge thermischer Strahlungsenergie mit dem Explosionswert zunimmt. So verursachen 4 cal/cm^2 bei einer 1-kt-Explosion Verbrennungen zweiten Grades; bei einer 10-Megatonnen-Explosion würden hierfür jedoch 7 cal/cm^2 erforderlich sein. Der Grund für diesen Unterschied liegt in der Tatsache, daß im ersteren Falle die Wärmeenergie in sehr kurzer Zeit empfangen wird, z. B. in nur wenigen Zehntelsekunden; im letzteren Falle jedoch kann sich die Energieabgabezeit auf mehrere Sekunden erstrecken. Wie bereits dargelegt (Abschn. 7.35), ist die zur Erzeugung einer bestimmten Wirkung erforderliche Wärmeenergiemenge im allgemeinen um so größer, je länger die Einwirkungszeit dauert.

7.47 Um die Veränderung der erforderlichen Wärmeenergie mit dem Explosionswert festzustellen, ist Bild 7.47 dargestellt, das die Bereiche der Verbrennungen ersten, zweiten und dritten Grades bei Kernexplosionen von 1 kt bis 20 Megatonnen aufzeigt. Der Darstellung der Kurven sind zwei bestimmte Annahmen zugrunde

[1]) Weitere Angaben über die Abhängigkeit der Wärmeenergieerfordernisse vom Explosionswert s. Bild 7.120.

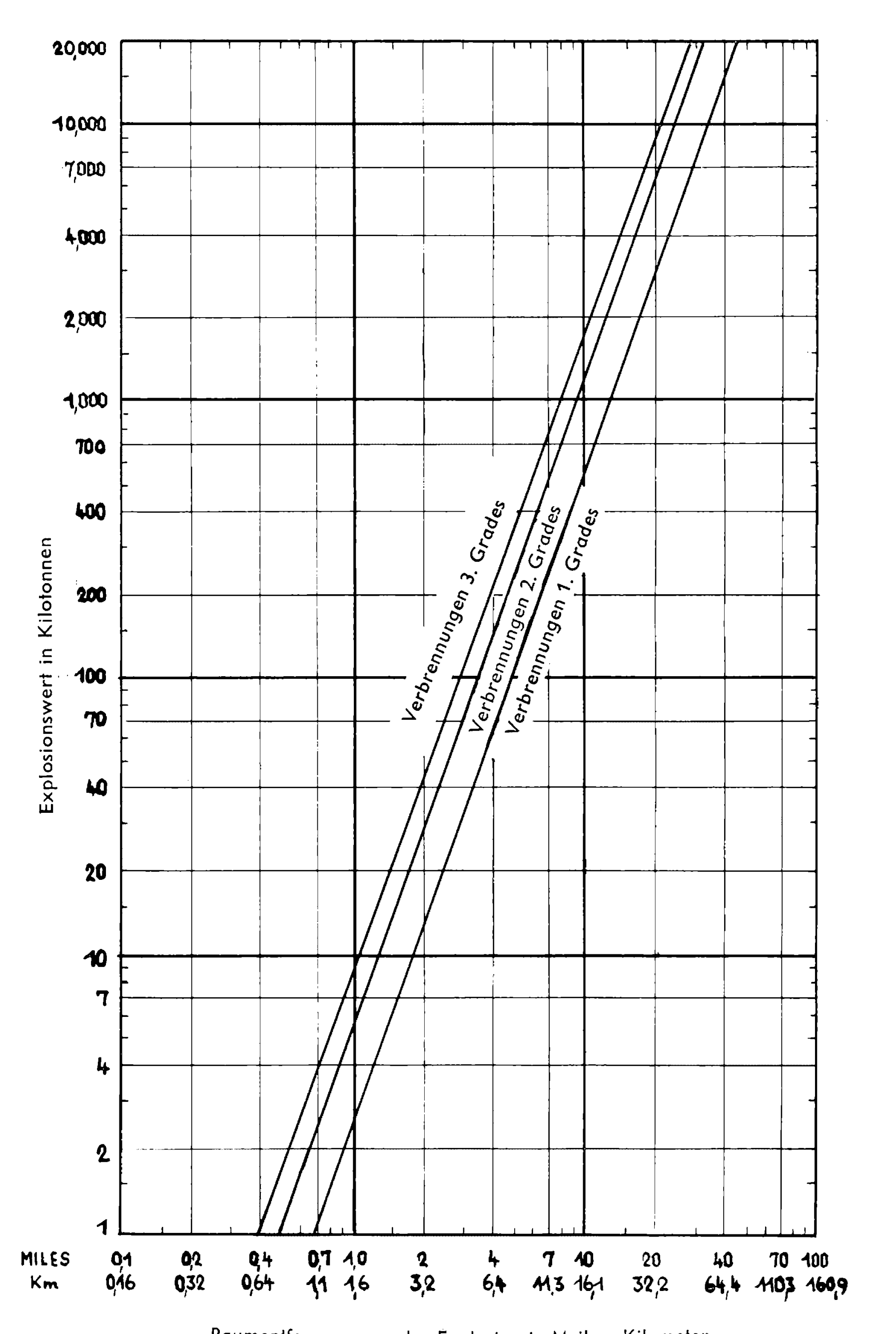


Bild 7.47 Entfernungen, bei denen auf ungeschützter Haut Verbrennungen entstehen.

gelegt: erstens ist angenommen worden, daß die Luftexplosion in der gleichen Höhe erfolgt, wie sie für die Luftdruckerscheinungen in Kap. III angesetzt ist. Bei einer Bodenexplosion wären die Entfernungen auf etwa 60% der in dem Bild angegebenen umzurechnen. Zweitens ist angenommen worden, daß einigermaßen klare Wetterverhältnisse herrschen, so daß bis zu 16 km oder mehr vom Nullpunkt die Schwächung im wesentlichen unabhängig von der Sichtweite ist. Bei dunstiger Atmosphäre liegen die in Bild 7.47 angegebenen Entfernungen, insbesondere bei hohem Explosionswert des Atomsprengkörpers, etwas über den tatsächlichen Entfernungen. Befindet sich unter dem Explosionspunkt eine größere Wolken- oder Rauchschicht, so sind die Entfernungen auf jeden Fall zu groß (s. Abschn. 7.19ff).

7.48 Die Anwendung des Bildes 7.47 kann dadurch veranschaulicht werden, indem es dazu benutzt wird, den ungefähren Grenzbereich für Verbrennungen 2. Grades bei einer Luftexplosion von 100 kt zu berechnen. Wir suchen den Punkt der Kurve, an dem die senkrechte Skala 100 kt anzeigt; die waagerechte Linie wird solange verfolgt, bis sie auf die zweite Kurve trifft, die die Verbrennungen zweiten Grades anzeigt. Der diesem Punkt entsprechende Wert auf der waagerechten (Entfernungs-)Skala wird mit 5,5 km festgestellt. Es ist also anzunehmen, daß bei einer 100-kt-Explosion mittlere Verbrennungen zweiten Grades (oder noch schwerere Verbrennungen) bis zu 5,5 km von der Explosion bei durchschnittlichen atmosphärischen Verhältnissen eintreten werden.

Wirksamkeit des zweiten Strahlungsimpulses

7.49 Ein wichtiger Punkt, insbesondere im Hinblick auf den Schutz gegen thermische Strahlung, ist der Zeitraum, in welchem die Strahlung ihre größte Wirksamkeit in bezug auf Hautverbrennungen entwickelt. Wie bereits erwähnt, ist festgestellt worden, daß der in dem ersten Strahlungsimpuls enthaltene Teil der Gesamtenergie, der emittiert wird, während die Oberflächentemperatur des Feuerballs auf das erste Minimum absinkt (Bild 2.92), gering ist. Es ist jedoch wissenswert, ob die während des ganzen zweiten Impulses, d. h. vom Minimum bis zum Maximum und zurück bis zum zweiten Minimum emittierte Strahlung von Bedeutung ist.

7.50 Auf Grund der Verringerung der mit zunehmender Entfernung vom Feuerball je Flächeneinheit empfangenen Wärmeenergie empfangen weiter entfernte Objekte weniger Energie als die in geringerer Entfernung befindlichen. Wenn die Objekte immer weiter von der Explosion entfernt sind, verringert sich die aus allen Abschnitten des Impulses empfangene Wärmeenergie proportional, so daß bei genügend großem Abstand keine Schäden eintreten. Der Teil des Wärme-Impulses, der am leichtesten auf einen unbedeutenden Wert verringert werden kann, liegt gegen Ende des Impulses, wenn die Intensität des Feuerballes verhältnismäßig gering geworden ist. So kann in einiger Entfernung von der Explosion der letzte Teil des Wärme-Impulses unschädlich sein, obwohl der Teil starker Intensität, insbesondere in der Nähe des Temperaturmaximums, noch Verletzungen verursachen kann.

In größerer Nähe des Feuerballes ist auch der letzte Teil des Impulses gefährlich, und im Bereich hoher Intensität ist dies noch stärker der Fall.

7.51 In jeglicher Entfernung von der Explosion liegt der gefährlichste Teil des Wärme-Impulses etwa in der Zeit des zweiten Temperaturmaximums des Feuerballes. Hier ist die thermische Strahlungsintensität des Feuerballes (oder der Anteil der Energie-Emission aus dem Feuerball) am größten. Infolgedessen ist auch der Anteil, mit welchem die Energie auf Objekte in jeglicher Entfernung von der Explosion einwirkt, hier am größten. Mit anderen Worten: aus einer gegebenen Explosion wird in einem bestimmten Zeitraum in der Nähe des Temperaturmaximums mehr Wärmeenergie empfangen als in jedem anderen, gleich langen Zeitraum während des Wärme-Impulses.

7.52 Diese Tatsachen sind in bezug auf die Wirksamkeit von Abwehrmaßnahmen, die man vielleicht trifft, um Verletzungen durch thermische Strahlung zu verringern, wichtig. Aus vorstehendem ist zu entnehmen, daß es zweckmäßig ist, derartige Maßnahmen zu treffen, bevor das Temperaturmaximum im zweiten Wärme-Impuls erreicht ist.

7.53 Bei einer Explosion im Kilotonnenbereich wäre es notwendig, innerhalb eines kleinen Bruchteils einer Sekunde Schutz zu suchen, wenn eine nennenswerte Verringerung von Wärmeverletzungen erreicht werden soll. Die Zeit ist zu kurz, um Abwehrmaßnahmen noch möglich zu machen. Dagegen könnten bei Explosionen im Megatonnenbereich innerhalb von 1 oder 2 Sekunden nach Erscheinen des Feuerballes Schutzvorkehrungen die Schwere der Verletzungen durch thermische Strahlung in vielen Fällen verringern und oft sogar Verletzungen verhüten. In Kap. XII ist das Problem der Abwehrmaßnahmen noch ausführlicher behandelt.

Schutz gegen Blitzverbrennungen

7.54 Wie in Abschnitt 7.21 gesagt, verringert das Dazwischenliegen von schattenwerfenden Objekten das Ausmaß der Verletzungen durch thermische Strahlung. In einem Gebäude kann ein behelfsmäßiger Schutz überall – natürlich nicht in der Nähe der Fenster – gesucht werden. Im Freien kann in einem Graben oder hinter einem Baum oder Leitungsmast einiger Schutz erzielt werden. Die beste instinktive Abwehrmaßnahme in jeder Notlage ist wohl, sich hinter dem ersten besten Schutz bäuchlings auf den Boden zu werfen, wobei die bekleideten Körperteile dazu benutzt werden, die Hände, das Gesicht und den Nacken zu schützen (s. Abschn. 12.60ff).

7.55 Die Kleidung kann auch einen Schutz gegen Blitzverbrennungen bieten. Die meisten üblichen hellfarbigen Kleider reflektieren einen großen Teil der einfallenden thermischen Strahlung, so daß damit schon ein wesentlicher Schutz vorhanden ist. Man hat z. B. festgestellt, daß zwei dicht übereinanderliegende Schichten Baumwollbekleidung – eine Oberbekleidung aus hellgrünem Stoff und eine gewirkte Unterbekleidung – die für Verbrennungen zweiten Grades erforderliche Energie von 4 auf 7,5 cal/cm^2 erhöhen. Liegen die beiden Kleiderschichten nicht dicht aufein-

ander und nicht dicht auf der Haut, dann ist die erforderliche Energie noch größer. Da jedoch eine mittlere Menge Wärmeenergie Kleidungsstücke zum Entzünden bringen kann (s. Tabelle 7.61), können Flammenverbrennungen vorkommen, selbst wenn keine Blitzverbrennung erfolgt.

7.56 Dunkle Stoffe sind geeigneter als hellfarbige, um die Strahlung zu absorbieren. Der Stoff kann aber durch die Absorption der thermischen Strahlung sehr heiß werden. Die Wärme wird dann entweder durch Wärmeleitung oder durch Strahlung auf die Haut übertragen. Meist geschieht dies durch die Wärmeleitung, und wenn der Stoff die Haut berührt, so ist dies besonders schwerwiegend. Deshalb können durch dunkelfarbige Kleider, die den Körper direkt berühren, Verbrennungen durch Berührung entstehen, die weder Blitzverbrennungen noch Flammenverbrennungen sind. Letztere werden natürlich entstehen, wenn der Stoff so heiß wird, daß er sich entzündet.

7.57 Weißes Bekleidungsmaterial von größerem Gewicht reflektiert einen großen Teil der thermischen Strahlung, so daß nur eine verhältnismäßig geringe Menge auf die Haut übertragen wird. Jedoch ist es bei nicht sehr schweren weißen Stoffen möglich, daß sie die Strahlungsenergie hindurchlassen und Hautverbrennungen verursachen, ohne selbst beschädigt zu werden.

7.58 In der Regel sind mindestens zwei Bekleidungsschichten zweckmäßig, um einen annehmbaren Schutz gegen Wärmeverletzungen zu schaffen. Die Oberbekleidung sollte vorzugsweise hellfarbig sein, und das Kleidungsstück sollte lose um den Körper gelegt sein, um ausreichenden Luftraum zwischen den einzelnen Schichten und zwischen der Unterbekleidung und der Haut zu schaffen. Eine geeignete Behandlung der Stoffe, insbesondere dunkelfarbigen Materials, um sie schwer entflammbar zu machen, wäre sehr vorteilhaft.

Materialschäden durch thermische Strahlung

Stoffe, Holz und Kunststoffe

7.59 An anderer Stelle in diesem Kapitel sind bereits die durch die hohen Oberflächentemperaturen bei Absorption thermischer Strahlung verursachten Beschädigungen von Stoffen behandelt worden. Naturfasern, z. B. Baumwolle und Wolle, sowie einige synthetische Stoffe, z. B. Kunstseide, versengen, verkohlen oder verbrennen vielleicht; Nylon dagegen schmilzt, wenn es ausreichend erhitzt wird. Die Wärmeenergie, die erforderlich ist, um eine bestimmte Veränderung an einem Stoff hervorzurufen, hängt von einer Vielzahl von Umständen ab (s. Abschn. 7.35). Die nachstehenden allgemeinen Angaben sind aber wohl für die meisten Fälle gültig.

7.60 Dunkelfarbige Stoffe absorbieren die Strahlung und werden deshalb leichter beschädigt als die gleichen Stoffe in heller Farbe. Aber je nach der Färbemethode und der verwendeten Faserart treten hier Unterschiede auf. Wolle ist widerstandsfähiger

gegen Strahlungsenergie als Baumwolle oder Kunstseide, und diese werden weniger leicht beschädigt als Nylon. Orlon scheint viel widerstandsfähiger zu sein als Nylon. Leichte Stoffe erfordern weniger Wärmeenergie für eine bestimmte Beschädigung als schwere Stoffe. Bei gleicher Einwirkungszeit ist die erforderliche Energie ungefähr proportional dem Stoffgewicht je Flächeneinheit. Der Feuchtigkeitsgehalt stellt ebenfalls einen bedeutsamen Faktor dar; je größer die in dem Stoff vorhandene Feuchtigkeitsmenge, um so größer ist die für seine Beschädigung erforderliche Energiemenge.

7.61 Obwohl ausgedehnte Untersuchungen über die Wirkungen der thermischen Strahlung auf eine große Zahl von Stoffarten durchgeführt worden sind, ist es schwierig, die Ergebnisse zusammenzufassen, da so viele veränderliche Faktoren vorhanden sind, die einen bedeutenden Einfluß ausüben. Trotzdem ist versucht worden, in Tabelle 7.61 Angaben über die Energiemenge zu bringen, die erforderlich ist, um verschiedene Stoffarten durch Absorption thermischer Strahlung zu entzünden. Es sind Ergebnisse aufgeführt für Luft- und Bodenexplosionen von 20 kt und 10000 kt (10 Megatonnen) Gesamtenergie. Wie bei Hautverbrennungen – und aus dem gleichen Grunde – ist bei Explosionen höheren Explosionswertes die erforderliche Wärmeenergie größer.

7.62 Holz verkohlt, wenn es der thermischen Strahlung ausgesetzt wird; die Tiefe der Verkohlung ist fast genau proportional der empfangenen Energie. Bei ausreichend großen Energiemengen kann Holz in massiver Form sich vorübergehend entflammen, aber eine dauerhafte Entzündung ist bei einer Kernexplosion unwahrscheinlich. Jedoch kann die kurz auftretende Flamme in unmittelbarer Nähe befindliches brennbares Material, das nicht direkt der Strahlung ausgesetzt ist, entzünden. Holz in mehr oder weniger fein verteilter Form, z. B. Sägemehl, Hobelspäne, Holzwolle, oder in morschem, porösem Zustand (Zunder) kann durch die thermische Strahlung aus einer Kernexplosion ziemlich leicht entzündet werden, wie wir weiter unten sehen werden.

7.63 Im allgemeinen sind etwa 10 bis 15 cal/cm² Wärmeenergie erforderlich, um ein sichtbares Verkohlen von nicht angestrichenem und nicht gebeiztem Kiefernholz, Douglas-Tannenholz, Rotholz und Ahornholz zu erzielen. Dunkle Beize läßt Holz leichter verkohlen, aber hellfarbige Anstriche und harte Lacke schaffen einen Schutz.[1])

7.64 Glas ist sehr widerstandsfähig gegen Wärme, da es aber sehr spröde ist, wird es manchmal durch durchsichtige oder lichtdurchlässige Kunststoffe ersetzt oder mit Kunststoffschichten kombiniert, wie z. B. bei Autowindschutzscheiben, um es splittersicher zu machen. Diese Kunststoffe sind organische Verbindungen, lösen sich also bei Wärme auf. Trotzdem ist festgestellt worden, daß viele Kunststoffe, wie Bakelit, Azetylzellulose, Luzit, Plexiglas, Polyäthylen und Teflon, der thermischen Strahlung bemerkenswert guten Widerstand leisteten. Es sind mindestens 60 bis 70 cal/cm² Wärmeenergie erforderlich, um ein Schmelzen oder Schwärzen der Oberfläche zu verursachen.

---

[1]) Die auf die Front des in Abschn. 7.34 erwähnten Hauses einfallende thermische Strahlungsenergie betrug etwa 25 cal/cm².

Tabelle 7.61 Ungefähre Wärmeenergien zur Entzündung von Stoffen

Material	Gewicht g/m²	Entzündungsenergie (cal/cm²) 20 kt	10 MT
Azetatkunstseidentaft (weinfarben)	100	2	3
Baumwollene Spitzenbettdecke (hellblau)	–	4	8
Gelackter Stoff, gespritzte Azetylzellulose	–	18	35
Baumwollmusselin, geölte Sonnenschutzvorhänge (grün)	270	5	11
Baumwollener Markisenstoff (grün)	400	5	9
Baumwollcord (braun)	270	6	11
Kunstseidenköper (schwarz)	100	1	2
Fensterjalousieband (schmutzigweiß)	–	7	12
Baumwollbettücher, ungebleicht, gewaschen (cremefarben)	100	15	30
Kunstseidenköper (beige)	100	8	16
Kunstseidengabardine (schwarz)	200	3	6
Baumwollenes Hemdentuch (gelbbraun)	170	7	13
Baumwolldrillich, gebraucht (blau)	340	8	13
Baumwollene und kunstseidene Autositzbezüge (dunkelblau)	300	8	13
Kunstseidenshantung (schwarz)	100	9	15
Kunstseidenazetat (weinfarben)	170	9	16
Kunstseiden-Marquisette-Vorhänge (elfenbeinfarben)	70	9	14
Baumwolldrillich, neu, gewaschen (blau)	340	9	14
Baumwollene Autositzpolster (grün-braun-weiß)	340	9	16
Kunstseidengarbardine (goldfarben)	240	9	20
Baumwollene Fensterjalousiegurte (weiß)	–	16	30
Wollflannel, neu, gewaschen (schwarz)	240	8	16
Baumwollener Wandteppich, festes Gewebe (braunschattiert)	400	16	30
Autositzpolster, wollene Oberschicht, baumwollene Unterschicht (grau)	440	16*)	35*)
Grobgewebter wollener Teppich (grau)	240	16*)	35*)
Wollenes Stuhlpolster (weinfarben)	540	16*)	35*)
Wollfries-Stuhlpolster (hellbraun)	475	16*)	35*)
Nylonstrümpfe (gelbbraun)	–	5*)	10*)
Baumwollene Matratzenfüllung (grau)	–	8	16
Packleinwand, dick, gewebt (braun)	610	8	16
Gummiertes Segeltuchautodach (grau)	680	16*)	28*)

*) In diesen Fällen wurde das Material nicht durch die angegebene einfallende Wärmeenergie zum Dauerbrand entzündet.

Wärmeenergien zur Entzündung verschiedener Materialien

7.65 Im Zusammenhang mit dem Entfachen von Bränden sind die zur Entzündung verschiedener, im Haushalt gebräuchlicher und sonstiger Materialien erforderlichen Wärmeenergien von großer Bedeutung. Sowohl im Laboratorium als auch bei Kernexplosionsversuchen sind Untersuchungen angestellt worden, und wenn die Ergebnisse auch keineswegs endgültig sind, liefern sie doch allgemeine Angaben über die Wärmeenergiemenge, die erforderlich sein würde, um ein bestimmtes Material zum Entzünden zu bringen. Die in Tabelle 7.65 enthaltenen Angaben sind in zwei Abschnitte aufgeteilt worden: in dem einen sind Haushaltmaterialien aufgeführt und in dem anderen brennbare Stoffe, welche Waldbrände entfachen können. Natürlich gibt es um viele Wohnhäuser herum brennbare Materialien, die durch Einwirkung von 3 cal/cm² thermischer Strahlung entzündet werden könnten. Fast jeder im Haushalt verwendete dünne, brennbare Stoff würde sich entzünden, wenn er 10 cal/cm² ausgesetzt würde.

7.66 In bezug auf brennbares Material in Wäldern sind die Entzündungsenergien weitgehend von der Feuchtigkeitsmenge abhängig, die dieses brennbare Material enthält. Für die vorliegenden Zwecke ist angenommen worden, daß Laub und Gras ziemlich trocken sind, so daß die Energien im wesentlichen Minimalwerte darstellen. Bei Vorhandensein trockener brennbarer Stoffe kann die thermische Strahlung einen Brand entfachen; dieser wird sich dann an brennbarem Material von größerem Feuchtigkeitsgehalt ausbreiten, welches nicht unmittelbar durch die Strahlung entzündet werden konnte.

Verhältnis der Wärmeenergie zur Entfernung

7.67 Um die in Tabelle 7.61 und 7.65 enthaltenen Angaben für die Feststellung verwenden zu können, wie weit vom Explosionspunkt bei gegebenen Explosionswerten das Entzünden eines bestimmten Materials zu beobachten wäre, muß man wissen, wie die Wärmeenergie sich mit der Entfernung bei dem betreffenden Explosionswert verändert. Eine geeignete Methode, dies darzustellen, ist in Bild 7.67 aufgezeigt, wobei ziemlich klare atmosphärische Verhältnisse zugrunde gelegt sind.

7.68 Nehmen wir an, es soll der Bereich ermittelt werden, in welchem Brände durch thermische Strahlung aus einer 1000-kt-(1-Megatonnen-)Luftexplosion entfacht werden. Nach den Ergebnissen der Tabelle 7.65 kann errechnet werden, daß die für ein Entzünden erforderliche Wärmeenergie bei durchschnittlichen Voraussetzungen etwa 5 cal/cm² beträgt. Nehmen wir den Punkt auf der senkrechten Achse des Bildes 7.67, der 1000 kt entspricht, und verfolgen wir die waagerechte Linie, bis sie die Kurve bei 5 cal/cm² thermischer Strahlung schneidet. Wir sehen dann, daß dieser Punkt einer Entfernung von 16 km von der Explosion entspricht; dies ergibt den Bereich, innerhalb dessen durch die Absorption thermischer Strahlung direkt Brände entfacht werden können. Bei dunstigen atmosphärischen Verhältnissen

oder im Falle einer Bodenexplosion werden die aus Bild 7.67 gewonnenen Entfernungen geringer sein. Ebenso wird eine dicke Wolken- oder Rauchschicht zwischen dem Ziel und dem Explosionspunkt die Entfernung verringern, in welcher Brände entfacht werden können (s. Abschn. 7.21 ff).

Tabelle 7.65 Wärmeenergien zur Entzündung von Haushaltmaterialien

Material	Gewicht g/m²	Entzündungsenergie (cal/cm²) 20 kt	10 MT
Staubmop (öliggrau)	–	3	5
Zeitungspapier, zerrissen	68	2	4
Krepp-Papier (grün)	34	4	8
Zeitungspapier in einzelnen Lagen	68	3	6
Zeitungspapier, flach gestapelt, Oberfläche ungeschützt	–	3	6
Zeitungspapier, verwittert, zerknüllt	34	3	6
Zeitungspapier, zerknüllt	68	4	8
Baumwollabfälle (öliggrau)	–	5	8
Stoß Schreibmaschinenpapier, neu (weiß)	68	15	30
Packpapier, Einzelblatt (gelbbraun)	68	7	14
Streichhölzer in Papierhülle, blaue Köpfe unbedeckt	–	5	9
Scheuerlappen aus Baumwollfaden, gebraucht, grau	–	6	10
Zelluloseschwamm, neu (rosa)	1300	6	10
Baumwollmop, alt (cremefarben)	–	7	13
Zeichenpapier in 3 Lagen (dunkel)	340	8	15
Zeichenpapier in 3 Lagen (weiß)	340	12	25
Pappkarton, flache Seite, gebraucht (braun)	540	8	15
Pappkarton, Blechecken ungeschützt, gebraucht (braun)	–	12	25
Strohbesen (gelb)	–	8	17
Holzwolle (Fichte, hellgelb)	32 kg/m³	5	12
Tampico-Faser-Scheuerbürste, gebraucht (schmutziggelb)	–	10	20
Palmfaser-Scheuerbürste, gebraucht (rostfarben)	–	12	25
Autositzbezüge, Papierstoff, gebraucht (mehrfarbig)	440	12	25
Leder, dünn (braun)	200	15*)	30*)
Autositzbezüge, Vinylkunststoff	340	16*)	27*)
Strohgewebe, alt (gelb)	440	16*)	33*)
Trockenes, morsches Holz (Zunderholz)	–	4	9
Feines Gras	–	5	10
Abgefallenes Laub	–	6	12
Weißtannennadeln	–	6	14
Grobes Gras	–	7	16
Fichtennadeln	–	8	17
Gelbkiefernnadeln, braun	–	8	18

*) bedeutet, daß das Material nicht die angegebene einfallende Wärmeenergie zum Dauerbrand entzündet.

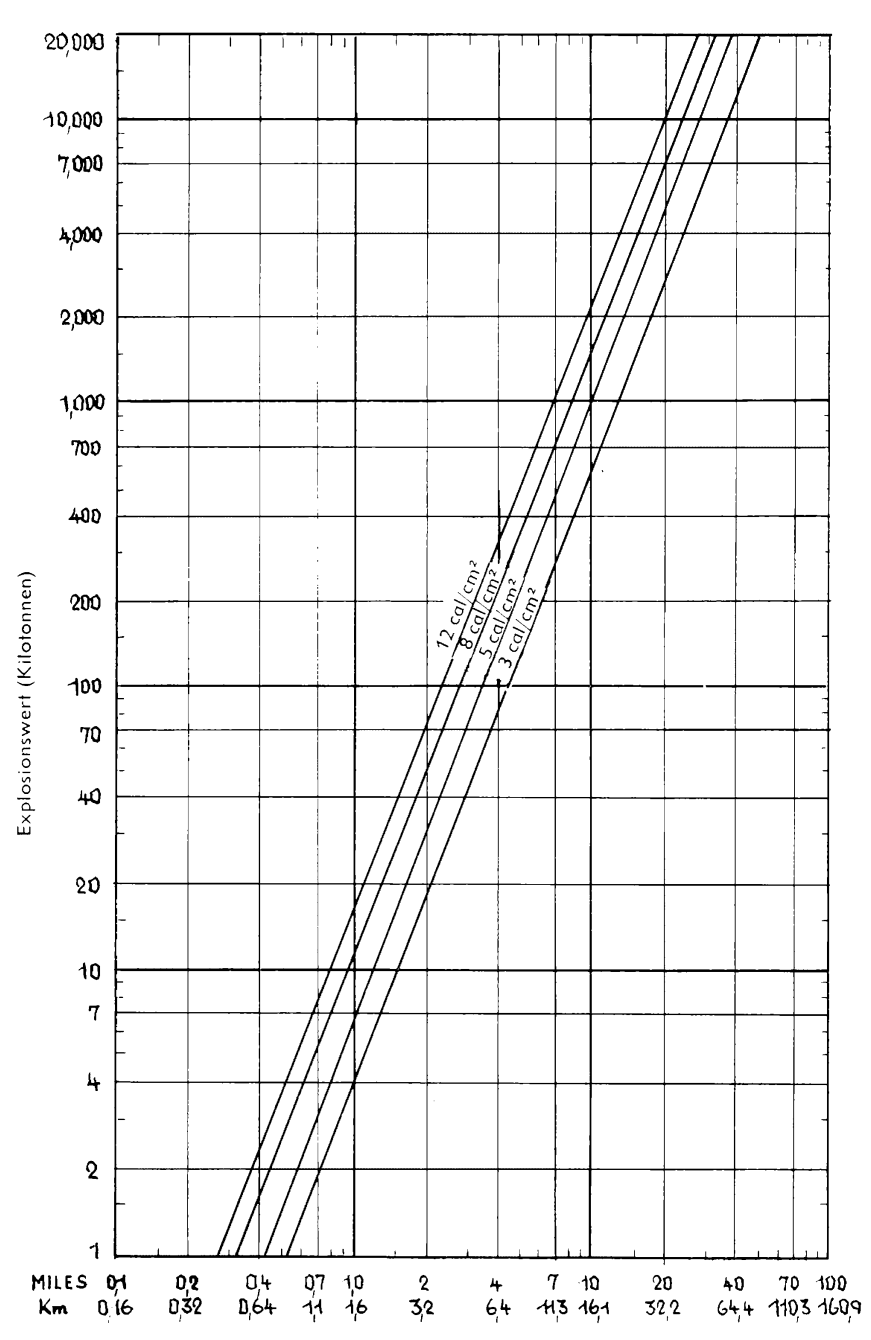


Bild 7.67 Empfangene Wärmeenergie bei verschiedenen Entfernungen im Raum

Wirkungen der thermischen Strahlung in Japan

Blitzverbrennungen

7.69 Eine der auffallendsten Tatsachen im Zusammenhang mit dem Atomsprengkörperabwurf auf Japan war die große Zahl der Verluste durch Blitzverbrennungen aus der thermischen Strahlung. Die Lage wurde dadurch verschärft, daß die Luft sehr klar war und nur leichte und knappe Bekleidung getragen wurde. Man hat geschätzt, daß 20 bis 30% der Verluste in Hiroshima und Nagasaki auf Blitzverbrennungen beruhten. Der Rest stellt Flammenverbrennungen dar. Verbrennungen durch thermische Strahlung wurden aus Entfernungen von etwa 4 km vom Nullpunkt in Nagasaki berichtet; die Wärmeenergie wurde hier auf etwa 2 cal/cm² geschätzt. Aus Hiroshima wurden Verbrennungen durch thermische Strahlung aus etwas geringeren Entfernungen berichtet. Wie zu erwarten war, kamen um so weniger Blitzverbrennungen vor, je größer die Entfernung von der Explosion war.

7.70 Ein bezeichnendes Merkmal für die Verbrennungen durch thermische Strahlung war ihre genaue Begrenzung auf ungeschützte Hautflächen, die dem Explosions-

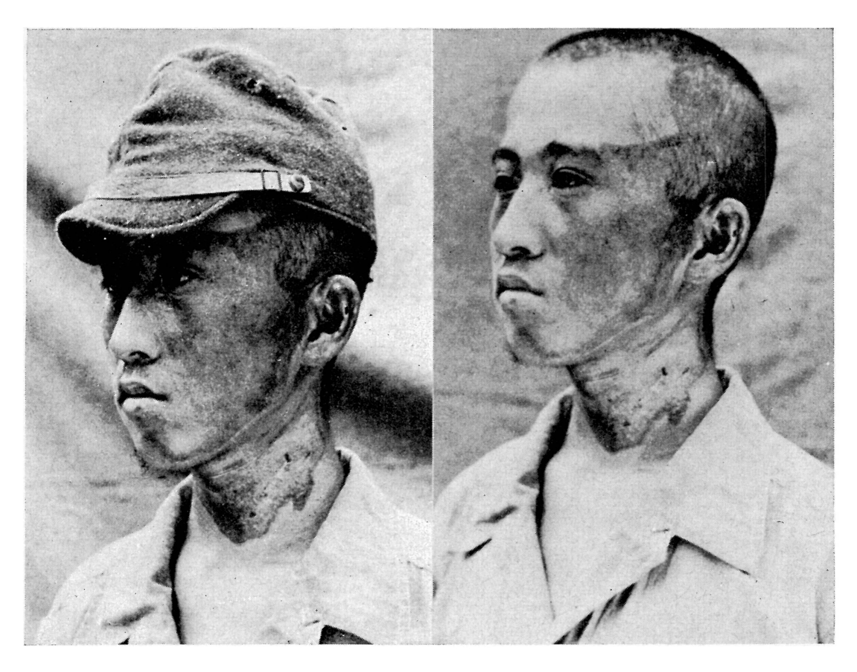


Bild 7.70 Teilweiser Schutz gegen die thermische Strahlung erzeugte »Profil«-Verbrennungen (2 km vom Nullpunkt). Die Mütze reichte aus, um den oberen Teil des Kopfes gegen Blitzverbrennungen zu schützen.



Bild 7.71 Die Haut ist an den Stellen, wo sie von der Kleidung berührt wurde, verbrannt. Die schützende Wirkung dickerer Kleiderschichten ist an den Schultern und auf dem Rücken zu erkennen.

zentrum zugewandt waren. Aus diesem Grunde hat man diese Verbrennungen auch »Profilverbrennungen« genannt (s. Bild 7.70). Diese Erscheinung beruhte auf der Tatsache, daß der größte Teil der empfangenen Strahlung in gerader Linie vom Feuerball gewandert war, so daß nur die unmittelbar der Strahlung ausgesetzten Flächen getroffen wurden. Ein deutliches Beispiel hierfür lieferte ein Mann, der vor einem Fenster mit Schreiben beschäftigt war. Seine Hände wurden schwer verbrannt, aber sein Gesicht und sein Hals, die nicht bedeckt waren, erlitten nur leichte Verbrennungen, weil der Einfallswinkel der Strahlung durch das Fenster das Gesicht und den Hals in den Halbschatten brachte.

7.71 Obwohl die Blitzverbrennungen meist auf die ungeschützten Körperteile begrenzt waren, kamen auch einige Fälle vor, in denen derartige Verbrennungen durch eine und ganz selten auch durch mehrere Bekleidungsschichten hindurch erfolgten. Jedoch wurden Beispiele hierfür nur in der Nähe des Nullpunktes beobachtet, wo ziemlich große Mengen Strahlungsenergie einwirkten. In den Fällen, in denen Verbrennungen durch die Kleidung hindurch vorkamen, waren nur die Körperstellen betroffen, an denen die Kleider sehr eng auf der Haut lagen, z. B. an den Ell-

bogen und den Schultern. Diese Verbrennungen sind vielleicht eher durch Berührung mit dem heißen Stoff entstanden (s. Abschn. 7.57) als durch direkte Strahlungseinwirkung. Die Körperstellen, an denen die Kleidung lose auflag, so daß sie durch einen Luftraum von der Haut getrennt war, wurden im allgemeinen durch die Strahlung nicht verletzt (Bild 7.71).

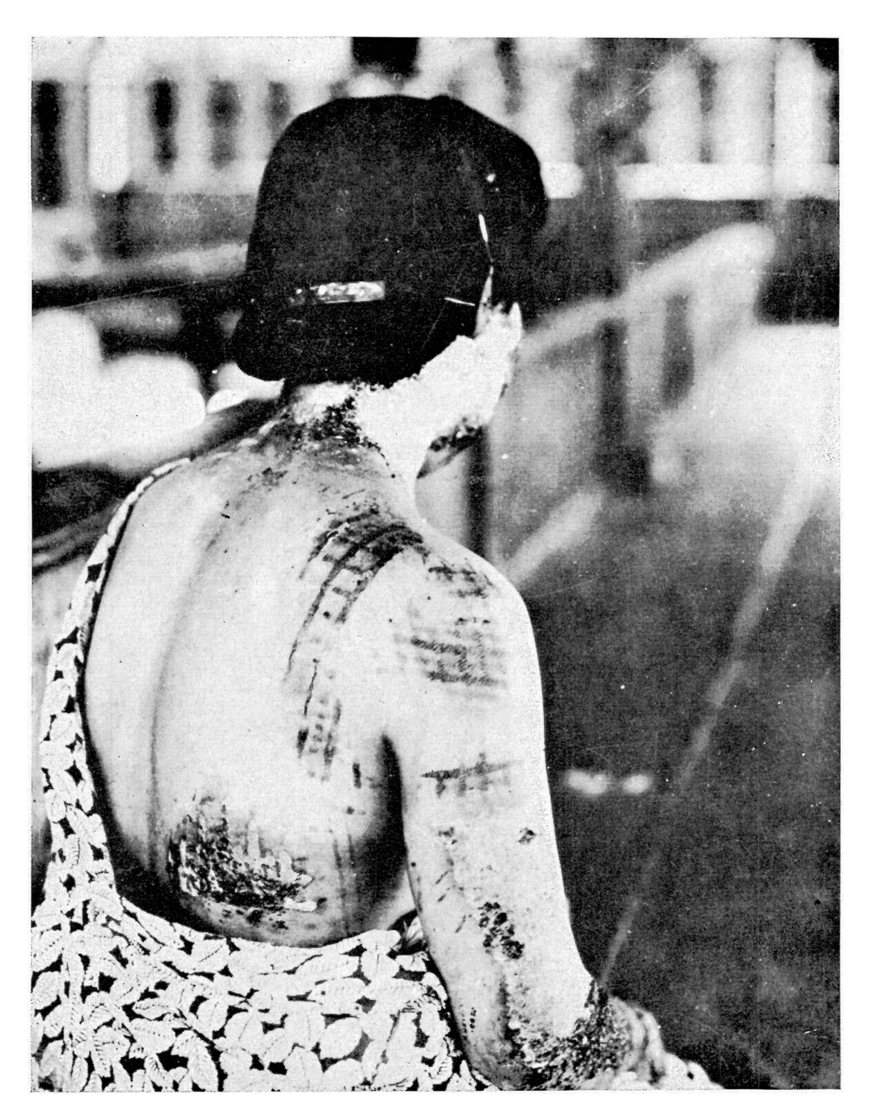


Bild 7.72 Die Haut der Patientin ist entsprechend dem dunkelgemusterten Kimono verbrannt, den sie zur Zeit der Explosion trug

7.72 In vielen Fällen entstanden Verbrennungen durch die schwarzen, jedoch nicht durch die weißen Bekleidungsstücke der gleichen Person hindurch (Bild 7.72). Dies wurde der Reflexion der thermischen Strahlung durch weiße oder andere hellfarbige Stoffe zugeschrieben, während dunkelfarbige Stoffe die Strahlung absorbierten, heiß wurden und somit Verbrennungen durch Berührung verursachten. In einigen Fällen wurde schwarze Oberbekleidung sogar entflammt; dadurch entzündete sich die Unterbekleidung, und es entstanden Flammenverbrennungen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen (s. Abschn. 7.57), daß weiße Kleidungsstücke nicht immer einen Schutz gegen die thermische Strahlung bieten. Manche solcher Stoffe leiten genügend Strahlen weiter, um Blitzverbrennungen auf der Haut entstehen zu lassen.

Weitere Wirkungen der thermischen Strahlung

7.73 Außer der eigentlichen Entzündung brennbarer Stoffe, wodurch Brände entfacht werden (die weiter unten behandelt sind), geht die starke Erwärmung infolge der Absorption der thermischen Strahlung auch aus einer Anzahl weiterer in Japan beobachteter Erscheinungen hervor. Stoffe (Bild 7.73a), Leitungsmasten (Bild 7.73b), Bäume und hölzerne Pfosten in einem Umkreis von 3,4 km vom Null-

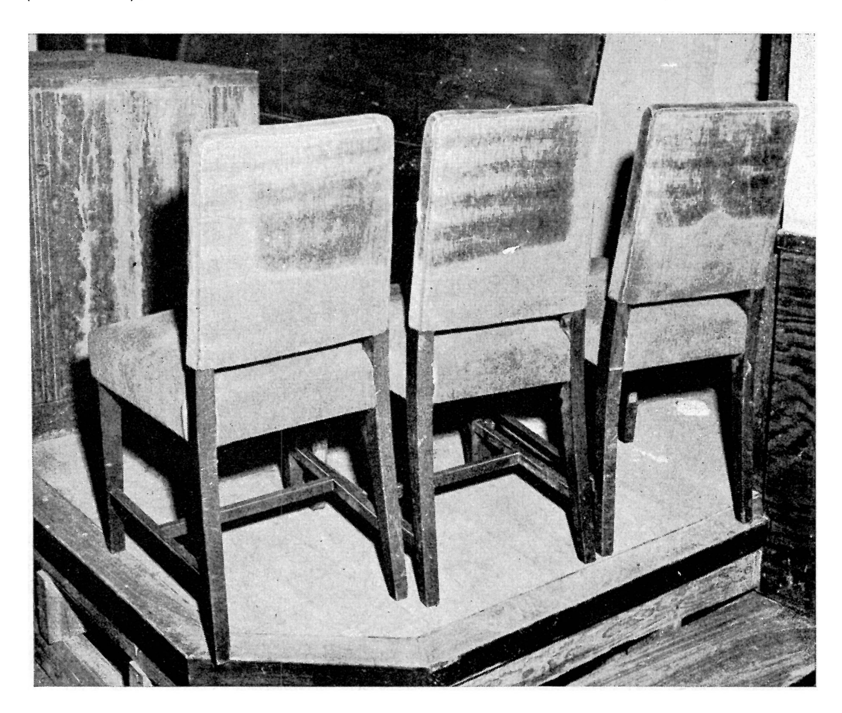


Bild 7.73a Blitzverbrennungen an Stuhlpolstern, die der thermischen Strahlung am Fenster ausgesetzt waren (1,6 km vom Nullpunkt in Hiroshima).

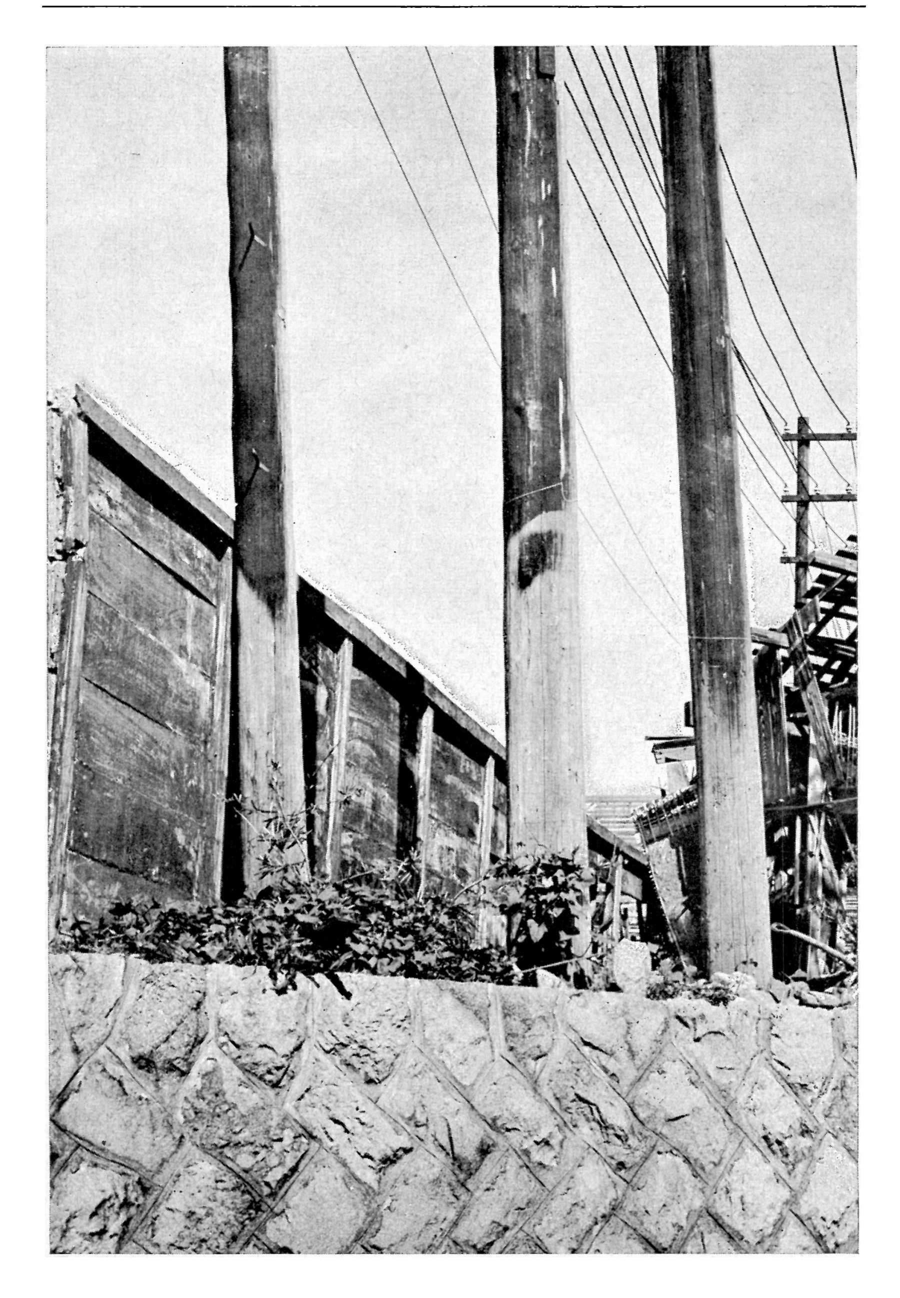


Bild 7.73b Blitzverbrennungen an hölzernen Masten (1,9 km vom Nullpunkt in Nagasaki). Die nicht verkohlten Teile waren vor der thermischen Strahlung durch einen Zaun geschützt.

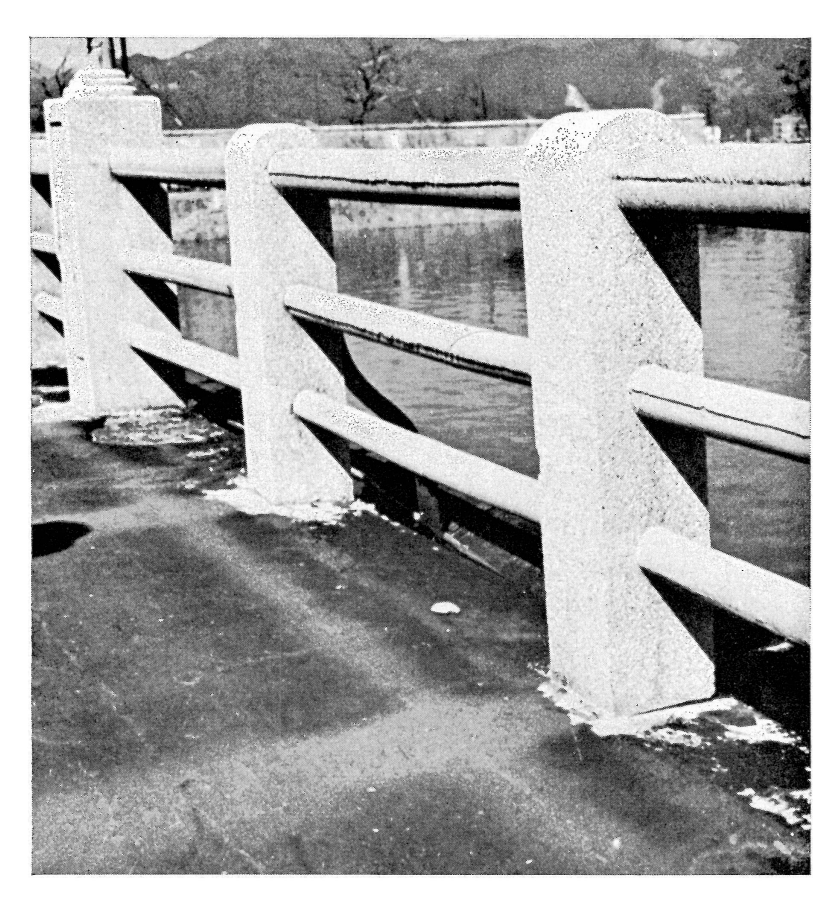


Bild 7.75a Durch die thermische Strahlung auf dem Asphalt der Brücke in Hiroshima erzeugte Blitzmarkierungen. Wo die Brückengeländer als Schutz vor der Strahlung dienten, waren keine Markierungen zu sehen; die Länge und Richtung der »Schatten« zeigen den Explosionspunkt des Atomsprengkörpers an.

punkt in Nagasaki und 2,7 km in Hiroshima (3 bis 4 cal/cm²) wurden, sofern sie nicht in der allgemeinen Feuersbrunst zerstört wurden, verkohlt und geschwärzt, jedoch nur an der dem Explosionspunkt zugekehrten Seite. Dort, wo ein Schutz durch Bauten, Mauern, Hügel und sonstige Objekte vorhanden war, wurden keine Wirkungen der thermischen Strahlung beobachtet.

7.74 Ein interessanter Fall solcher Schattenwirkung wurde aus Nagasaki berichtet. Die Spitzen und oberen Teile einer Reihe hölzerner Pfosten wurden schwer verkohlt, die verkohlten Flächen wurden aber durch den Schatten einer Mauer scharf abgegrenzt. Die Mauer wurde jedoch durch die Luftdruckwelle, die nach der thermischen Strahlung ankam, vollständig zerstört. Wie bereits dargelegt, wandert

diese Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit, während die Luftdruckwelle sehr viel langsamer vorwärtsdringt (Abschn. 3.14).

7.75 Aus Beobachtungen der Schatten, die dazwischenliegende Objekte dort hinterlassen haben, wo sie Flächen abschirmten, die andernfalls der Strahlung ausgesetzt gewesen wären (Bild 7.75a und b), wurde die Richtung des Explosionszentrums mit ziemlicher Genauigkeit festgestellt. Außerdem erhielt man durch Betrachtung der Schattenwirkungen an verschiedenen Stellen rund um die Explosion gute Anhaltspunkte für die Explosionshöhe. Dann und wann wurde ein deutlich erkennbarer Halbschatten festgestellt; hieraus konnte man den Durchmesser des Feuerballes zu der Zeit feststellen, als die thermische Strahlungsintensität am größten war.

7.76 Eine der auffallendsten Wirkungen der Strahlung war die Rötung der Oberfläche von glattem Granit, der der Strahlung direkt ausgesetzt war. Diese Rötung entstand durch die ungleichmäßige Ausdehnung der kristallinischen Bestandteile des Steins, und es wird angenommen, daß eine Temperatur von mindestens 600° C erforderlich war, um die beobachteten Wirkungen zu erzeugen. Aus der Tiefe der Rötung und dem schließlichen Abblättern der Granitoberfläche konnte die Tiefe

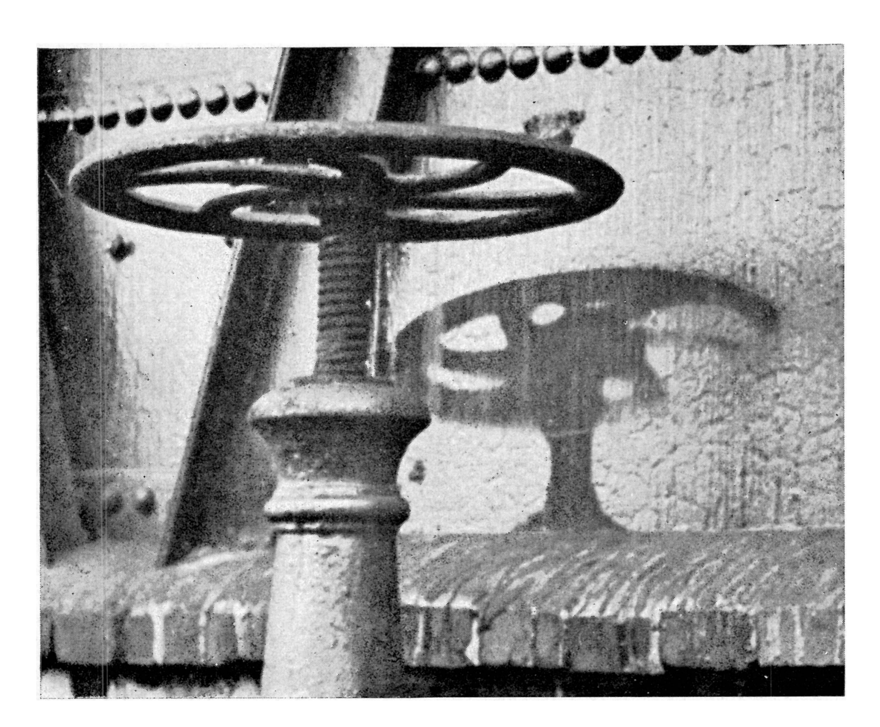


Bild 7.75b Anstrich auf Gasometer durch die thermische Strahlung versengt, außer den Stellen, wo er durch den Absperrhahn geschützt war (2,1 km vom Nullpunkt in Hiroshima).

festgestellt werden, bis zu welcher diese Temperatur erreicht wurde. Diese Beobachtungen wurden dazu benutzt, um die maximalen Bodentemperaturen zur Zeit der Explosion zu berechnen. Wie aus Abschnitt 7.32 ersichtlich, waren diese Temperaturen außerordentlich hoch, insbesondere in der Nähe des Nullpunktes.

7.77 Eine weitere Wärmewirkung, die sich bei den nachfolgenden Untersuchungen als wertvoll erwies, war das Aufquellen oder Blasenwerfen der dunkelgrünen Ziegel mit poröser Oberfläche, die vielfach in Japan zum Dachdecken verwendet werden (Bild 7.77). Diese Erscheinung wurde bis zu 1200 m vom Explosionszentrum beobachtet, wo die Wärmeenergie etwa 40 cal/cm² betrug. Die Größe der Blasen und ihr Bereich waren um so größer, je geringer die Entfernung bis zum Nullpunkt und je direkter der Dachziegel der Explosion zugekehrt war. Bei einem Laborversuch, bei dem unbeschädigte Ziegel der gleichen Art verwendet wurden, wurde festgestellt, daß eine ähnliche Blasenbildung durch eine 4 Sekunden andauernde Erwärmung auf 1800° C erreicht werden konnte, obwohl sich hier die Wirkung auf den Dachziegel auf eine größere Tiefe erstreckte als in Japan. Hieraus schloß man, daß bei der Kernexplosion eine Temperatur von mehr als 1800° C während eines Zeitraums von weniger als 4 Sekunden erreicht worden war.

7.78 Das unterschiedliche Verhalten der hellen und dunklen Stoffe, die in Japan der thermischen Strahlung ausgesetzt waren, ist ebenfalls sehr interessant. Hellfarbige Stoffe reflektieren oder übertragen den größten Teil der thermischen Strah-

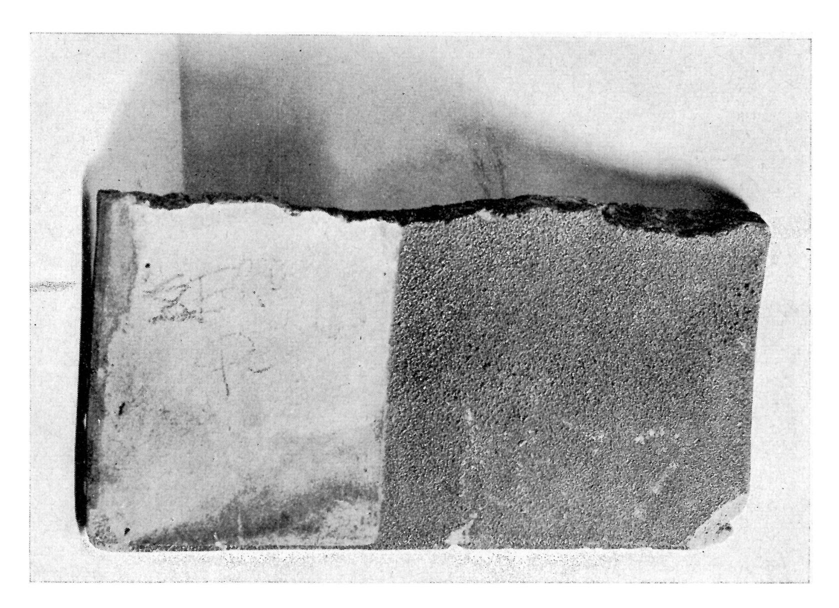


Bild 7.77 Blasige Oberfläche eines Dachziegels; linker Teil des Ziegels war durch einen überhängenden anderen Ziegel geschützt (etwa 600 m von der Explosion in Hiroshima).

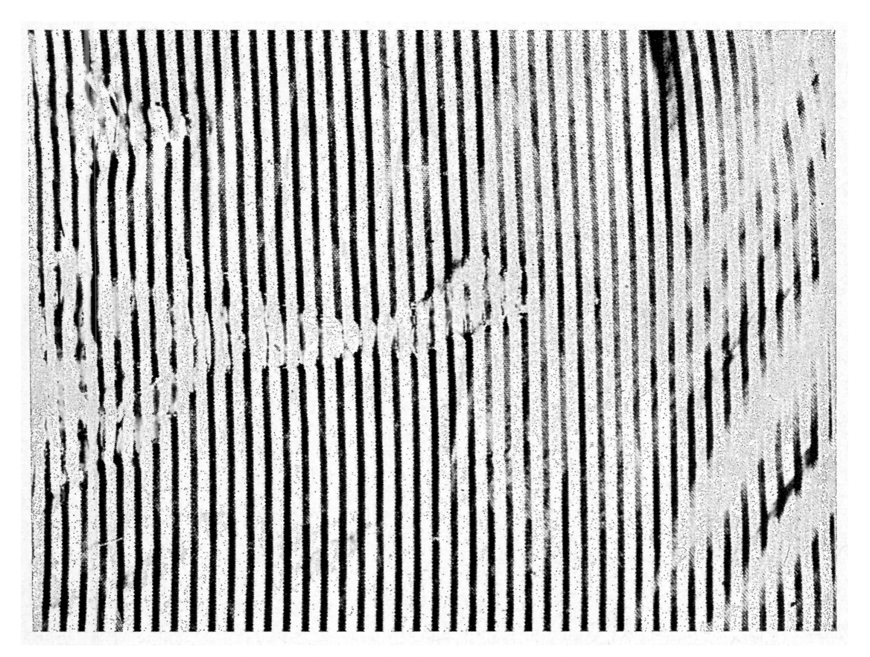


Bild 7.78 Die hellfarbigen Teile des Stoffes sind heil, aber einige der dunkelfarbigen Streifen sind durch die Wärme aus der thermischen Strahlung zerstört worden.

lung und absorbieren nur wenig davon. Infolgedessen erreichen sie nicht eine so hohe Temperatur und werden deshalb nicht so leicht beschädigt wie dunkle Stoffe, die einen großen Teil der Strahlung absorbieren. In einem Falle waren bei einem Hemd mit schmalen hell- und dunkelgrauen Streifen die dunklen Streifen ausgebrannt, während die hellfarbigen Streifen unbeschädigt blieben (Bild 7.78). Ebenso waren bei einem Stück Papier, welches der Strahlung in einer Entfernung von etwa 2,4 km vom Nullpunkt ausgesetzt war, die mit schwarzer Tinte geschriebenen Buchstaben ausgebrannt, aber der Rest des Papiers war nicht sehr stark beschädigt.

Brandwirkungen

Brandursachen

7.79 Bei einer Kernexplosion können Brände auf zweierlei Art entstehen: erstens durch die Entzündung von Papier, Abfällen, Fenstervorhängen, Markisen, Holzwolle, trockenem Gras und Laub als unmittelbare Folge der Absorption thermischer Strahlen; zweitens: als indirekte Wirkung der durch die Luftdruckwelle

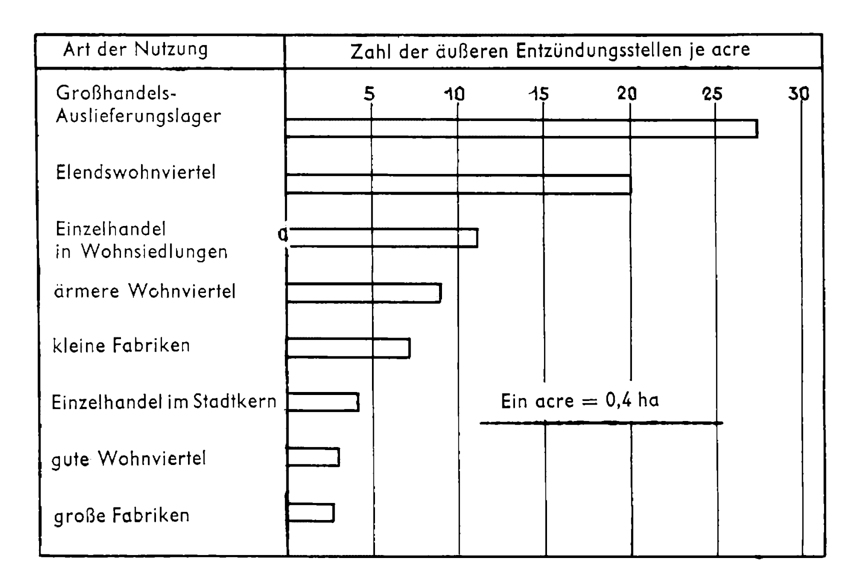


Bild 7.80 Häufigkeit der äußeren Entzündungsstellen in verschiedenen Gegenden einer Stadt

verursachten Zerstörung können Brände durch umgeworfene Öfen und Herde, elektrischen Kurzschluß und Gasrohrbrüche entfacht werden. Ohne Rücksicht auf die Ursache des Brandes wird seine Ausbreitung durch die Menge und die Verteilung der in der Nähe befindlichen brennbaren Stoffe bestimmt. Wir sehen also, daß das Problem der Brandentstehung bei einer Kernexplosion in zwei Kategorien zerfällt: 1. Anzahl der Stellen, an denen Brände entstehen, 2. Beschaffenheit der Umgebung.

7.80 Die Entstehung indirekter Brände ist schwer zu analysieren, jedoch sind einige Faktoren der direkten Entzündung durch thermische Strahlung ziemlich klar. Der bedeutendste ist wohl die sog. »Dichte der Entzündungsstellen«, d. i. die Anzahl der Stellen auf einer gegebenen Fläche, z. B. einem Hektar, wo brennbare Stoffe vorhanden sind, wie sie im vorhergehenden Abschnitt erwähnt sind. Im allgemeinen ist anzunehmen, daß diese Stoffe sich entzünden, wenn sie 3 bis 5 cal/cm² Strahlungsenergie ausgesetzt sind. Die in Bild 7.80 angeführten Angaben basieren auf Berichten einer Anzahl von Großstädten in den Vereinigten Staaten. Wir sehen, daß die Dichte der Entzündungsstellen am größten in Großhandels-Auslieferungsstellen und Elendswohnvierteln und am geringsten in guten Wohngegenden und großen Fabrikbezirken ist[1]). Papier war überall, abgesehen von innerstädtischen Einzelhandelsbezirken, wo die Markisen die häufigste Brandquelle darstellten, das am meisten vorkommende Entzündungsmaterial.

7.81 Die Dichte der Entzündungsstellen gibt einige Anhaltspunkte für die Möglichkeit des Entstehens von Bränden bei idealen Wetterverhältnissen. Aber die An-

[1]) Die Gebietsarten entsprechen der vom amerikanischen statistischen Amt angewandten Klassifikation.

gaben aus Bild 7.80 genügen noch nicht, um die Anzahl der tatsächlich entstehenden größeren Brände zu schätzen. Erstens geraten an allen Orten in der Nähe des Nullpunktes, wo die Wärmeenergie mehr als 12 cal/cm² beträgt, alle entzündbaren Stoffe in Brand (Tabelle 7.65). In größeren Entfernungen vom Nullpunkt dagegen fangen nur sehr leicht entzündliche Stoffe an zu brennen. Außerdem erfordert die Entstehung eines größeren Brandes, der imstande ist, sich auszubreiten, größere Mengen in der Nähe befindlicher brennbarer Stoffe, und dies ist nicht immer der Fall.

7.82 Die Tatsache, daß Anhäufungen von entzündbaren Abfällen in der Nähe eines Holzbauwerks eine große Brandgefahr darstellen, ist bei den im Jahre 1953 in Nevada durchgeführten Versuchen bewiesen worden. Bei diesen Versuchen wurden 3 kleine Holzhäuser, von denen jedes einen von einem Holzzaun umgebenen Hof hatte, 12 cal/cm² thermischer Strahlung ausgesetzt. Eines der Häuser (Bild 7.82 links) hatte verwitterte Wände, die schon recht verfallen waren, aber der Hof war frei von Abfällen. Das nächste Haus hatte ebenfalls einen sauberen Hof, außerdem waren die Wände außen gut erhalten und angestrichen. Bei dem dritten Haus, rechts auf dem Bild, waren die Wände in schlechtem Zustand und verwittert, und auf dem Hof lag viel Abfall herum.

7.83 Der Zustand der drei Häuser nach der Explosion ist aus Bild 7.83 ersichtlich. Das dritte Haus (rechts) geriet sehr bald in Brand und verbrannte bis auf den Grund. Das erste Haus (links) entzündete sich, aber es brachen 15 Minuten lang keine



Bild 7.82 Hölzerne Versuchshäuser vor der Kernexplosion auf dem Versuchsgelände von Nevada

Flammen aus. Das gut erhaltene Haus in der Mitte mit dem sauberen Hof wurde nur angesengt. Zu erwähnen ist, daß das Holz eines neu errichteten, weiß angestrichenen Hauses, das etwa 25 cal/cm² ausgesetzt war, stark verkohlte, sich aber nicht entzündete (Bild 7.34b).

7.84 Der große Wert feuerbeständiger Möbel in bezug auf die Zahl der Entzündungsstellen wurde bei den Versuchen von 1953 ebenfalls bewiesen. Zwei gleichartige, stabil gebaute Häuser, von denen jedes ein Fenster von 1,2 × 1,8 m hatte, welches der Explosion zugekehrt war, standen dort, wo die thermische Strahlung 17 cal/cm² betrug. Eines der Häuser enthielt kunstseidene Vorhänge, baumwollene Teppiche und Kleidungsstücke; wie zu erwarten, geriet es unmittelbar nach der Explosion in Brand und verbrannte vollständig. In dem anderen Hause waren die Vorhänge aus Vinyl-Kunststoff, und die Teppiche und Kleidungsstücke waren aus Wolle. Obwohl mehrere Entzündungen erfolgt waren, konnte die Bergungsmannschaft, die das Haus eine Stunde nach der Explosion betrat, die Brände löschen.

7.85 Bei der Entstehung von Bränden durch thermische Strahlung ist noch ein anderer Faktor zu erwähnen, nämlich die Möglichkeit, daß die bei Entzündung eines brennbaren Stoffes entstehende Flamme anschließend von dem Luftstoßwind gelöscht werden kann. Man hat geglaubt, Anzeichen einer solchen Wirkung aus den in Japan angestellten Beobachtungen festzustellen, aber dies war wohl ein Ausnahmefall. Das Problem wurde sowohl im Zusammenhang mit den Wirkungen in Japan als auch bei verschiedenen Kernversuchen studiert, und das Ergebnis geht dahin, daß

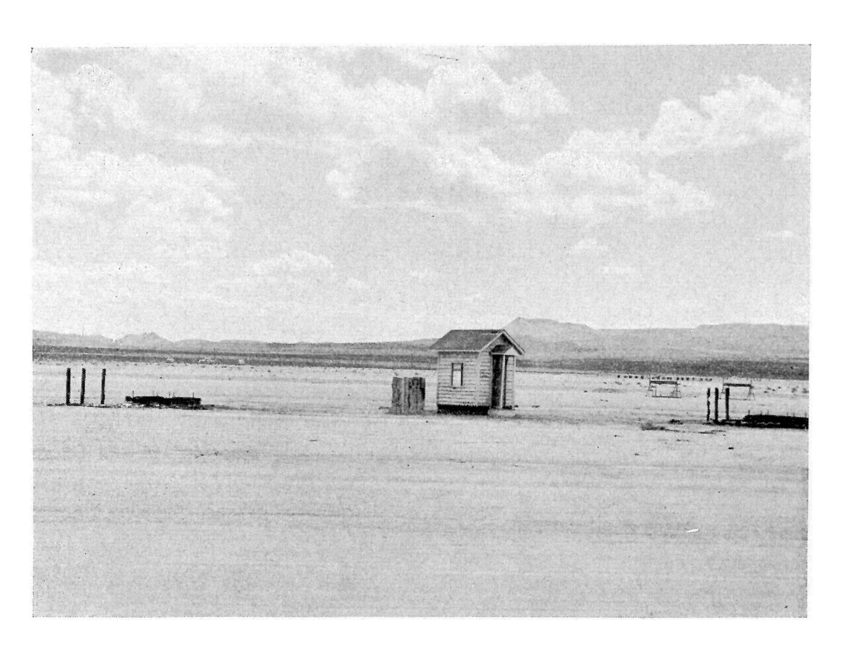


Bild 7.83 Hölzerne Versuchshäuser nach der Kernexplosion

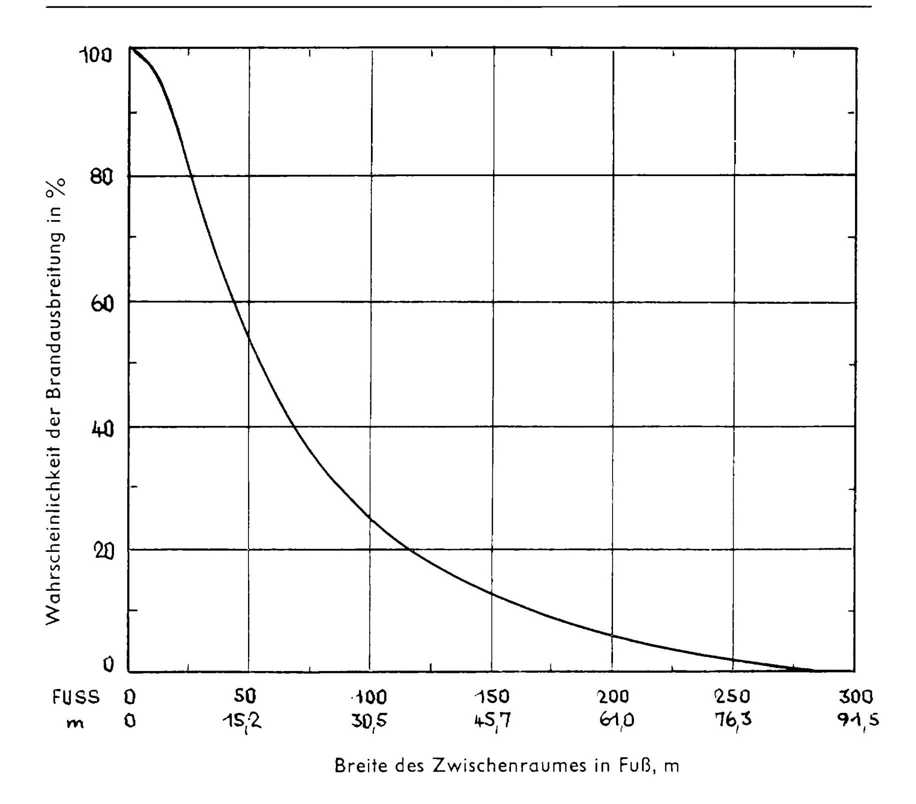


Bild 7.87 Breite der Baulücke und Wahrscheinlichkeit der Brandausbreitung

der Luftstoßwind keine nennenswerte Wirkung in bezug auf das Löschen von Bränden hat (s. Abschn. 7.93).

Ausbreitung von Bränden

7.86 Die Ausbreitung von Bränden in einer Stadt hängt von einer Reihe von Faktoren ab, z. B. Wetter, Geländeform sowie Dichte und Brennbarkeit der Gebäude. Eine eingehende Überprüfung von Großbränden hat jedoch gezeigt, daß bei mehr oder weniger gleichen sonstigen Voraussetzungen die Entfernung zwischen den Gebäuden das bedeutsamste Merkmal für die Wahrscheinlichkeit einer Brandausbreitung ist. Aus allgemeinen Erwägungen geht hervor, daß die Wahrscheinlichkeit der Brandausbreitung von einem Gebäude auf das andere um so geringer ist, je geringer die Bebauungsdichte eines Gebietes ist. Ferner ist die Möglichkeit einer Löschung des Brandes um so größer, je größer die Zwischenräume zwischen den Gebäuden sind.

7.87 Die Kurve in Bild 7.87 vermittelt einen ungefähren Eindruck darüber, wie die Wahrscheinlichkeit der Brandausbreitung, prozentual ausgedrückt, von der Durchschnittsentfernung zwischen den Gebäuden in einer Stadt abhängt. Die Ergebnisse sind in gewissem Maße von der Art der Bauwerke abhängig, ob sie z. B. feuerbeständig sind oder nicht, und ferner auch von dem durch die Luftdruckwelle verursachten Schaden (Abschn. 7.79). Zu erwähnen ist, daß Bild 7.87 sich auf die Ausbreitung von Bränden bei einer Kernexplosion bezieht, bei der eine große Anzahl kleiner Brände unmittelbar durch die thermische Strahlung und mittelbar auf andere Weise entfacht wird.

7.88 Ein weiterer Gesichtspunkt der Brundausbreitung ist die Entstehung von Großbränden in einem Walde nach vorheriger Entzündung von trockenem Laub, Gras und morschem Holz durch die thermische Strahlung. Einige der Faktoren, die das Anwachsen solcher Brände beeinflussen, sind der Feuchtigkeitsgehalt der Bäume, die Geländeform und die Wetterverhältnisse. Geringer Feuchtigkeitsgehalt der Luft, starke Winde und steile Geländeform begünstigen die Entwicklung von Waldbränden. Im allgemeinen ist zu erwarten, daß ein Laubwald, insbesondere wenn er belaubt ist, weniger schnell und weniger stark brennt als ein Nadelwald. Grüne Blätter und die Baumstämme wirken als Abschirmung gegen die thermische Strahlung, so daß die Anzahl der Stellen, an denen in einem Walde eine Entzündung erfolgt, viel geringer sein kann, als es auf den ersten Blick den Anschein hat.

Die Brandwirkungen in Japan

Der Atomsprengkörper als Brandwaffe

7.89 Die Brandwirkungen einer Kernexplosion weisen keine besonderen charakteristischen Merkmale auf. Grundsätzlich wird in bezug auf Zerstörungen durch Feuer und Luftdruck das gleiche Gesamtergebnis bei Anwendung von herkömmlichen Brand- und Sprengbomben erreicht. Man hat z. B. geschätzt, daß die in Hiroshima entstandenen Brandschäden an Gebäuden und anderen Bauwerken auch durch 1000 t über dem Stadtgebiet verteilter Brandbomben hätten erzielt werden können. Da diese Schäden jedoch durch einen einzigen Atomsprengkörper von nur 20 kt Explosionswert verursacht wurden, sieht man, daß Kernwaffen starke Zerstörungen durch Feuer sowie durch Luftdruck verursachen können.

7.90 Aus den Kernexplosionen über Japan geht hervor, daß die Brandschäden viel mehr von der örtlichen Geländeform und den Wetterverhältnissen abhängig sind als die Luftdruckwirkungen. Sowohl in Hiroshima als auch in Nagasaki waren die Entfernungen vom Nullpunkt, in denen bestimmte Arten von Luftdruckschäden auftraten, weitgehend die gleichen. Aber der Bereich der Brandwirkungen war ganz verschieden. In Hiroshima z. B. war das gesamte durch Feuer schwer beschä-

digte Gebiet – etwa 11,4 km² – ungefähr 4mal so groß wie in Nagasaki. Ein mitwirkender Umstand war die unregelmäßige Anlage der Stadt Nagasaki im Vergleich zu Hiroshima; auch hätten größere Zerstörungen wahrscheinlich durch einen anderen Explosionspunkt erreicht werden können. Trotzdem war der Unterschied in der Geländeform und der Bebauungsdichte ein bedeutender Faktor. Hiroshima war verhältnismäßig eben und dicht bebaut, während Nagasaki in der Nähe des Nullpunktes hügelige Gebiete hatte, die nicht bebaut waren.

Die Entstehung und Ausbreitung der Brände in Japan

7.91 Die japanischen Beobachter stellten eindeutig fest, daß dünne, dunkle Baumwollgewebe, z. B. die während des Krieges verwendeten Verdunklungsvorhänge, dünnes Papier und trockenes, morsches Holz durch die thermische Strahlung in einer Entfernung bis zu etwa 1000 m vom Nullpunkt (etwa 35 cal/cm²) in Brand gerieten. Es wurde berichtet, daß beobachtet wurde, wie weiter entfernt ein Dach aus Zedernrinde offenbar sofort in Flammen stand; dies wurde aber nicht mit Bestimmtheit bestätigt. Ungewöhnlich große Strahlungsmengen auf Grund von Reflexions-, Streuungs- und Konzentrationswirkungen hätten Brände an vereinzelt liegenden Stellen hervorrufen können (Bild 7.91).

7.92 Ein interessanter Beweis für die Entzündung von gesundem Holz wurde etwa 1,6 km vom Nullpunkt in Nagasaki festgestellt, wo die Wärmeenergie ungefähr 15 cal/cm² betrug. Ein leichtes Stück Holz, ähnlich der Seitenfläche einer Apfelsinenkiste, war auf seiner Vorderfläche verkohlt. Außerdem wurde eine Schwärzung durch die Ritzen und Nagellöcher hindurch festgestellt, wo die thermische Strahlung sonst nicht eingedrungen wäre, sowie rund um die an die verkohlte Fläche angrenzenden Kanten. Dies ist möglicherweise so zu erklären, daß die der Strahlung ausgesetzte Holzfläche sich durch die Hitze aus der thermischen Strahlung entzündete und die Flamme sich durch die Ritzen und Löcher rund um die Kanten mehrere Sekunden lang ausbreiteten, bevor sie durch den Luftstoßwind gelöscht wurden.

7.93 Aus dem sowohl in Hiroshima als auch in Nagasaki gefundenen verkohlten Holz wurde ursprünglich gefolgert, daß dieses Holz durch die thermische Strahlung entzündet worden war und daß die Flammen dann durch den Luftdruck ausgelöscht wurden. Es erscheint jetzt jedoch wahrscheinlicher, daß – abgesehen von einigen Ausnahmefällen wie dem eben geschilderten – eine Entzündung des Holzes nicht tatsächlich stattgefunden hat. Die Absorption der thermischen Strahlung verursachte das Verkohlen von gesundem Holz, aber die Temperaturen waren im allgemeinen nicht hoch genug, um eine Entzündung eintreten zu lassen (Abschn. 7.34). Morsches, rissiges Holz und Holzwolle verbrennen aber erfahrungsgemäß völlig, und die Flamme wird durch die Luftdruckwelle nicht wesentlich beeinträchtigt.

7.94 Es ist nicht bekannt, wieweit die thermische Strahlung zur Entstehung von Bränden bei den Atomangriffen in Japan beigetragen hat. Es ist möglich, daß bis zu etwa 1,5 km vom Nullpunkt manche Brände durch indirekte Ursachen entstanden

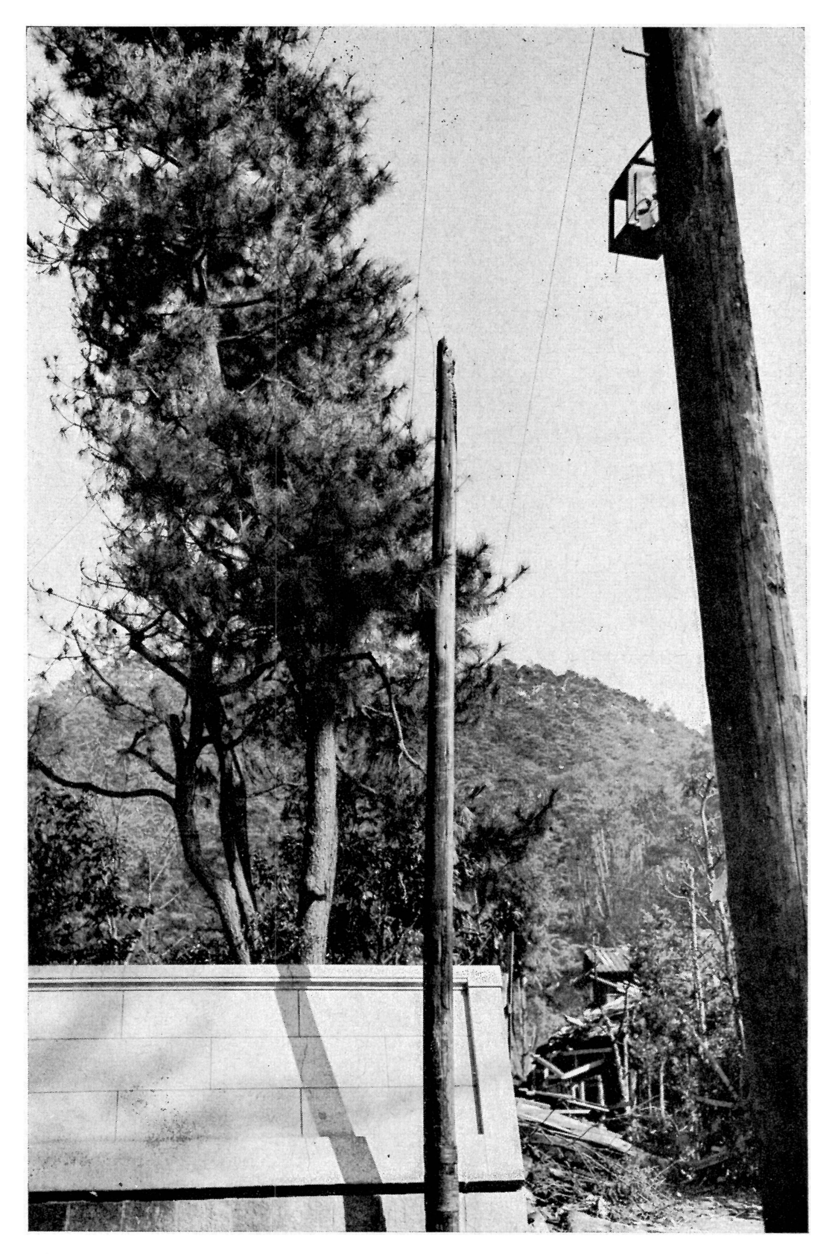


Bild 7.91 Es wurde berichtet, daß die Spitze eines hölzernen Mastes durch die thermische Strahlung entzündet wurde (2 km vom Nullpunkt in Hiroshima); man beachte die nicht verbrannte Umgebung: das nächste verbrannte Gebäude lag in 110 m Entfernung.

sind, z. B. durch umgestürzte Öfen, elektrischen Kurzschluß, Gasrohrbrüche usw., die eine unmittelbare Wirkung der Luftdruckwelle waren. Eine Anzahl von Bränden in Industrieanlagen entstand durch umgekippte Herde und Heizkessel und durch den Einsturz von Gebäuden auf diese Herde und Heizkessel.

7.95 War der Brand einmal entstanden, dann wurde seine Ausbreitung von mehreren Faktoren beeinflußt, die mit den durch die Kernexplosion verursachten Zerstörungen in direktem Zusammenhang standen. Durch zerbrochene Fensterscheiben, herausgeblasene oder beschädigte Brandjalousien (Bild 7.95), durch abgerissene Wandverkleidungen und Dachplatten sowie durch einstürzende Wände und Dächer machte der Luftdruck viele Gebäude brandempfindlicher. Nichtbrennbare (feuerbeständige) Bauwerke wurden oft in einem Zustand verlassen, der die innere Ausbreitung des Feuers durch Schäden an den Treppen, Aufzügen und in Brandmaueröffnungen sowie durch Einstürzen von Decken und Innenwänden begünstigte (Bild 4.85d).

7.96 Wenn dagegen brennbare Gerippebauten umgeblasen wurden, dann brannten sie nicht so rasch, als wenn sie stehengeblieben wären. Außerdem deckten

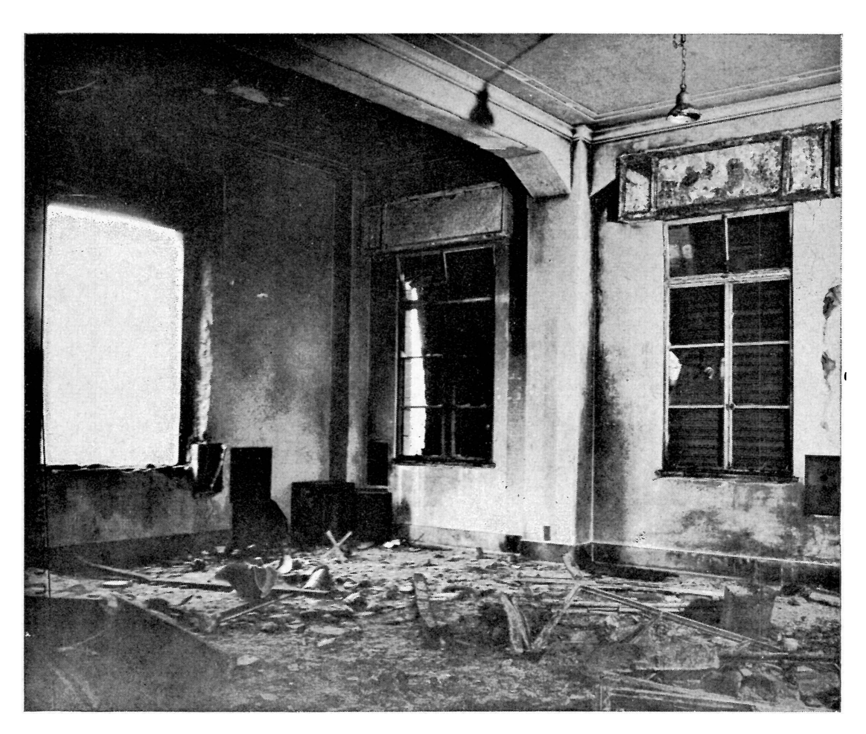


Bild 7.95 Brandjalousien in einem Gebäude, die durch den Luftdruck ausgeblasen oder beschädigt wurden; die Brandjalousie in der Mitte wurde wahrscheinlich durch den Luftdruck, der durch das Gebäude ging, nach außen ausgeblasen (920 m vom Nullpunkt in Hiroshima).

die aus dem Luftdruck herrührenden, nichtbrennbaren Trümmerstücke oft die brennbaren Stoffe ab und verhüteten ihr Verbrennen. Es ist jedoch etwas zweifelhaft, ob im großen ganzen die Wirkung des Luftdruckes derart war, daß die Entstehung von Bränden in Hiroshima und Nagasaki begünstigt oder erschwert wurde.

7.97 Obwohl Brandschneisen natürlicher Art, z. B. Flüsse und Freiflächen, sowie künstlicher Art, z. B. Straßen und freigemachte Flächen, in den japanischen Städten vorhanden waren, haben diese die Ausbreitung der Brände nicht sehr wirksam verhindert. Der Grund hierfür lag darin, daß die Brände oft gleichzeitig auf beiden Seiten der Brandschneisen ausbrachen, so daß sie nicht ihrem gedachten Zweck dienen konnten. Außerdem waren oft brennbare Materialien durch den Luftdruck über die Brandschneisen und Freiflächen, wie Höfe und Straßenräume, verstreut worden, so daß sie die Ausdehnung der Brände nicht verhindern konnten. Trotzdem halfen die Brandschneisen in einigen Fällen, das Ausbrennen mancher feuerbeständigen Gebäude zu verhindern.

7.98 Einer der bedeutendsten Gesichtspunkte der Atomangriffe auf Japan lag darin, daß die Feuerwehren in dem großen Raum, der zu gleicher Zeit Luftdruckschäden erlitten hatte, vollständig überlastet waren. Die Brandbekämpfungseinrichtungen und -geräte waren zwar nach amerikanischen Maßstäben unzureichend, aber es ist auch zweifelhaft, ob unter den gegebenen Umständen wirksamere Feuerwehren mehr hätten erreichen können. In Hiroshima z. B. wurden 70% der Brandbekämpfungsgeräte beim Einsturz der Spritzenhäuser zerstört, und 80% des Personals wurden einsatzunfähig. Selbst wenn Menschen und Maschinen den Luftdruck überlebt hätten, hätte man zu vielen Bränden keinen Zutritt gehabt, da die Straßen mit Trümmern blockiert waren. Aus diesem Grunde sowie auch wegen der Furcht, vom Feuer eingeschlossen zu werden, war es einer Feuerwehrmannschaft aus einem Gebiet, das der Zerstörung entgangen war, nicht möglich, näher als 2 km vom Nullpunkt in Nagasaki heranzukommen. Deshalb war es fast unvermeidlich, daß alle Gebäude in diesem Bereich zerstört wurden.

7.99 Ein weiterer Faktor bei der Zerstörung durch Feuer war das Versagen der Wasserversorgung sowohl in Hiroshima als auch in Nagasaki. Die Pumpstationen waren nicht stark betroffen, aber es waren schwere Schäden durch die Zerstörung von Rohrleitungen und Sammelrohren entstanden, woraus sich Undichtigkeiten und ein Absinken des Wasserdrucks ergaben. Die meisten der über der Erde liegenden Rohrleitungen wurden durch einstürzende Gebäude und durch die Wärme aus den Bränden, die die Rohre zum Schmelzen brachte, zerstört. Manche unterirdischen Wasserrohrleitungen wurden unterbrochen, andere wurden durch den Einsturz oder die Zerstörung von Brücken, auf denen sie auflagen, zerstört (Abschn. 4.113).

Feuersturm in Hiroshima

7.100 Etwa 20 Minuten nach der Explosion des Atomsprengkörpers in Hiroshima entwickelte sich das als »Feuersturm« bekannte Phänomen. Dieses bestand aus einem Wind, der in Richtung des brennenden Gebietes der Stadt aus allen Richtungen

wehte und 2–3 Stunden nach der Explosion eine Höchstgeschwindigkeit von 50 bis 65 km/h erreichte, die sich nach 6 Stunden auf eine mittlere oder geringe Geschwindigkeit verringert hatte und aus verschiedenen Richtungen kam. Der Wind wurde von zeitweiligem Regen begleitet, der über dem Stadtzentrum nur leicht und in 1000–1500 m Entfernung in nördlicher und westlicher Richtung stärker war.
Wegen des starken Soges in Bodenhöhe war der Feuersturm ein entscheidender Faktor bei der Begrenzung der Ausbreitung des Feuers über das ursprünglich in Brand gesetzte Gebiet hinaus. Dadurch war der Radius des ausgebrannten Gebietes in Hiroshima so einheitlich und nicht viel größer als der Bereich, in dem bald nach der Explosion die Brände entstanden. Jedoch wurde praktisch alles Brennbare in diesem Bereich zerstört.

7.101 Zu erwähnen ist, daß der Feuersturm keineswegs ein besonderes Merkmal des Atomsprengkörpers ist. Ähnliche Feuerstürme sind bei großen Waldbränden in den Vereinigten Staaten beobachtet worden und besonders nach Brandbombenangriffen in Deutschland und Japan während des zweiten Weltkrieges. Die starken Winde werden vor allem durch den Aufwärtssog der heißen Luft in einem großen brennenden Gebiet erzeugt. Sie entsprechen also, in sehr großem Maßstab gesehen, dem Abzug eines Kamins, unter dem ein Feuer brennt. Der mit einem Feuersturm verbundene Regen beruht offenbar auf der Kondensation von Feuchtigkeit an Teilchen aus dem Feuer, wenn diese in kühlere Luftschichten aufsteigen.

7.102 Das Entstehen von Feuerstürmen hängt von den zur Zeit des Feuers vorhandenen Verhältnissen ab. So war über Nagasaki kein so schwerer Sturm aufgetreten, obwohl die Geschwindigkeit des Südwestwindes, der zwischen den Bergen wehte, auf 56 km/h anstieg, als die Feuersbrunst um sich gegriffen hatte, d. h. etwa 2 Stunden nach der Explosion. Dieser Wind war geeignet, das Feuer das Tal hinauf in einer Richtung weiterzutragen, wo es nichts Brennbares gab. Etwa 7 Stunden später hatte sich der Wind nach Osten gedreht, und seine Geschwindigkeit war auf 16–24 km/h abgesunken. Diese Winde schränkten zweifellos das Ausbreiten des Feuers in der jeweiligen Richtung, aus der sie wehten, ein. Die kleine Zahl der dem Feuer ausgesetzten Wohnungen in dem langen, schmalen Tal, das sich durch Nagasaki erstreckte, bot nicht genügend Nahrung für die Entwicklung eines Feuersturms im Vergleich zu den vielen Gebäuden auf dem ebenen Gelände in Hiroshima.

Die technischen Grundlagen der thermischen Strahlung[1])

Spektrale Energieverteilung aus dem Feuerball

7.103 Wenn angenommen werden kann, daß der Feuerball bei einer Kernexplosion sich ebenso wie die Sonne etwa wie ein schwarzer Körper verhält, d. h. wie ein idealer Strahler, dann kann die Verteilung der thermischen Strahlungsenergie

[1]) Die übrigen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

über das Spektrum zu der Oberflächentemperatur nach dem Planckschen Strahlungsgesetz in Beziehung gesetzt werden. Wenn $E\lambda \cdot d\lambda$ die Energiedichte, d. h. die Energie je Volumeneinheit, in dem Wellenlängenintervall λ bis $d\lambda$ ist, dann ist

$$E\lambda = \frac{8\pi h c}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda k T} - 1} \tag{7.103.1}$$

Hierbei ist c die Lichtgeschwindigkeit, h ist das Plancksche (Wirkungs-)Quantum, k ist die Boltzmannsche Konstante, d. h. die Gaskonstante je Molekül, und T ist die absolute Temperatur.

7.104 Aus dem Planckschen Gesetz kann man die Energiedichte der thermischen Strahlung aus einer Kernexplosion in einem Wellenlängenbereich bei jeder Temperatur errechnen. Die Ergebnisse für mehrere Temperaturen sind in den Kurven in Bild 7.104 dargestellt. Man ersieht daraus, daß bei Temperaturen von mehr als etwa 8000° K, die während des größten Teils des ersten Strahlungsimpulses aus dem Feuerball, d. h. vor dem ersten Temperaturminimum auftreten, ein großer Teil der ausgestrahlten Wärmeenergie im kurzwelligen (ultravioletten) Bereich des Spektrums liegt.

7.105 Wenn die Temperatur des schwarzen Strahlers abnimmt, sehen wir, daß die Wellenlänge, bei der die Energiedichte am geringsten ist, sich nach rechts bewegt, d. h. in Gebiete größerer Wellenlänge. Eine Formel für die Wellenlänge bei maximaler Energiedichte λm erhält man, indem man die Gleichung 7.103.1 nach der Wellenlänge differenziert und das Ergebnis gleich Null setzt. Dann erhalten wir

$$\lambda_m = \frac{A}{T} \tag{7.105.1}$$

Hierbei ist A eine Konstante, die 0,2897 Å · °K beträgt. Dann steht die Wellenlänge bei maximaler Energiedichte in umgekehrtem Verhältnis zur absoluten Temperatur.

7.106 Aus dem bekannten Wert A kann errechnet werden, daß die maximale Energiedichte der thermischen Strahlung bei einer Temperatur von etwa 7600° K genau in den sichtbaren Bereich des Spektrums fällt. Diese Temperatur liegt nahe der maximalen Oberflächentemperatur des Feuerballes nach dem Minimum, d. h. während des zweiten Strahlungsimpulses (Bild 2.92). Da die Temperatur 7600° K nicht übersteigt und der Durchschnitt sehr viel niedriger liegt, ersieht man, daß der größte Teil der im zweiten Impuls emittierten Strahlungsenergie aus sichtbaren und infraroten Strahlen besteht und nur ein kleiner Teil im ultravioletten Bereich des Spektrums liegt.

Wärmeenergie aus dem Feuerball

7.107 Für die Zwecke dieser Abhandlung ist die Gesamtemission der Strahlungsenergie aus dem Feuerball von größerer Bedeutung als die Verteilung der Strahlungsdichte. Nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz der schwarzen Strahlung (Hohl-

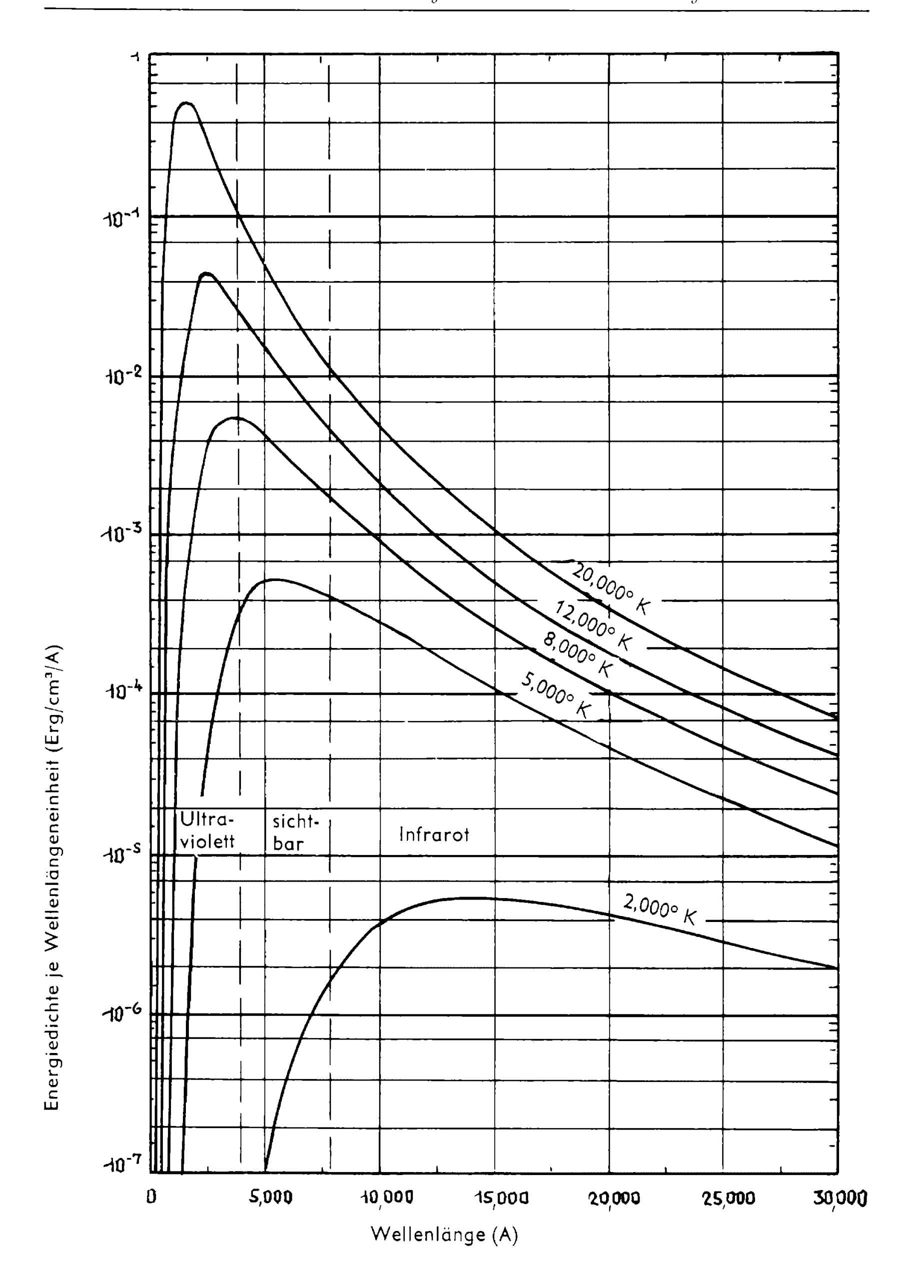


Bild 7.104 Energiedichte je Wellenlängeneinheit von Strahlungen verschiedener Wellenlänge

raumstrahlung) wird der Energiefluß (oder die Intensität) der Strahlung, $\varnothing$, d. h. die Energiemenge, die je Sekunde durch 1 cm^2 Fläche eines schwarzen Strahlers fließt, zur absoluten Temperatur durch die Gleichung

$$\varnothing = \sigma T^4 \tag{7.107.1}$$

in Beziehung gesetzt, wobei σ eine Konstante ist.

Der Wert $\varnothing$ kann auch ermittelt werden durch Integration der Planckschen Gleichung (7.103.1) bei gleichbleibender Temperatur in dem ganzen Wellenlängenbereich von null bis unendlich. Dann ist

$$\sigma = 2\pi^5 k^4/15 h^3 c^2$$
$$= 1{,}38 \times 10^{-12}\,\text{cal/(cm}^2\text{) (sec) (grd}^4\text{)}.$$

Wenn σ bekannt ist, kann die gesamte Intensität der Strahlungsenergie aus dem Feuerball, der sich wie ein schwarzer Strahler verhält, für jede Temperatur leicht errechnet werden.

7.108 Nach Gleichung 7.107.1 ist die Intensität der aus dem Feuerball emittierten Strahlung bei jeder Temperatur proportional der vierten Potenz dieser absoluten Temperatur. Da die Oberflächentemperaturen während des ersten Strahlungsimpulses sehr hoch sind, ist auch der Anteil der Energieemission (je Flächeneinheit), hauptsächlich im ultravioletten Bereich, sehr hoch. Jedoch ist die Gesamt*menge* der emittierten Energie wegen der kurzen Dauer des ersten Impulses verhältnismäßig gering. In jedem Falle wird der größte Teil der emittierten Energie durch die Atmosphäre absorbiert und gestreut, bevor sie sich über eine nennenswerte Entfernung vom Feuerball fortbewegt.

7.109 Entsprechend der Definition des Strahlungsflusses $\varnothing$ nach Abschn. 7.107 kann der Gesamtanteil der Strahlungsenergie aus dem Feuerball ermittelt werden, indem die Formel in Gleichung 7.107.1 mit der Fläche multipliziert wird. Wenn R der Radius des Feuerballes ist, dann ist seine Fläche $4\pi R^2$, und damit ist der Strom der Wärmeenergie-Emission $\sigma T^4 \times 4\pi R^2$. Das ist das gleiche wie die Wärmeleistung, da Leistung die Geschwindigkeit der Energieerzeugung (oder des Energieaufwandes) ist. Stellen wir diese Größe mit dem Zeichen P dar, dann ist

$$P = 4\pi\sigma T^4 R^2$$
$$= 1{,}71 \times 10^{-11}\, T^4 R^2 \text{ cal/sec,} \tag{7.109.1}$$

hierbei ist T in Grad Kelvin und R in Zentimetern angegeben. (Oder wenn der Radius R in Fuß ausgedrückt wird, ist

$$P = 1{,}59 \times 10^{-8}\, T^4 R^2 \text{ cal/sec.)}$$

7.110 Die Ergebnisse zahlreicher Versuche haben gezeigt, daß der Feuerball sich in Wirklichkeit wie ein idealer Strahler verhält. Dies beruht auf einer Anzahl von Faktoren. Die Oberflächentemperatur während des ersten Strahlungsimpulses wird durch die gestörte Luft unmittelbar um den Feuerball verändert, und später ist die

Temperatur nicht die der Oberfläche, sondern das Ergebnis der Strahlung etwas weiter im Innern des Feuerballs. Der Radius des Feuerballes während des zweiten Wärmeimpulses ist sehr schwer zu bestimmen, da die Oberfläche des leuchtenden Feuerballes stark aufgelöst wird. Da die Radien und die Oberflächentemperaturen vom Explosionswert abhängen, erhält man für jeden Explosionswert eine andere Kurve. Man kann jedoch die Ergebnisse durch Anwendung von Umrechnungsgesetzen verallgemeinern, so daß man aus einem einzigen Berechnungssystem eine Kurve erhalten kann, die für den zweiten Impuls jedes Explosionswertes gilt.

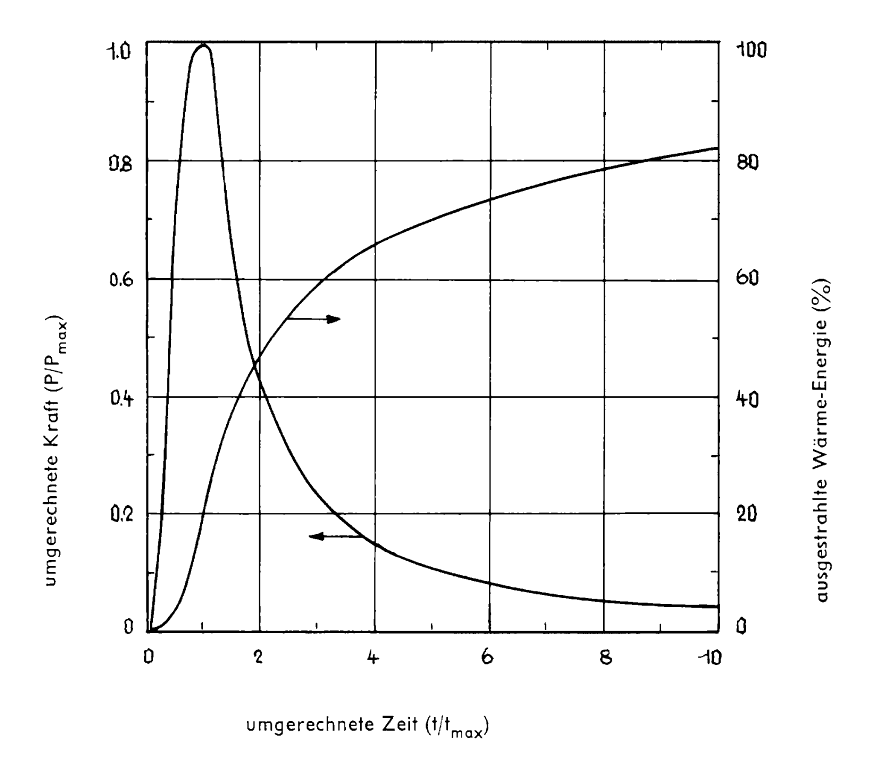


Bild 7.111 Umgerechnete Strahlungsleistung des Feuerballs und Bruchteil der Wärmeenergie in Abhängigkeit von der umgerechneten Zeit im zweiten Wärme-Impuls

Die Kurven zeigen die Veränderung der umgerechneten Leistung $P/P_{\max}$ des Feuerballes (linke Ordinate) und des Prozentsatzes der gesamten ausgestrahlten Wärmeenergie E/E_{tot} (rechte Ordinate) mit der umgerechneten Zeit $t/t_{\max}$.

Umrechnung: Um die Daten aus Bild 7.111 auf eine Explosion von beliebigem Explosionswert (W kt) anwenden zu können, werden folgende Gleichungen verwendet:

$$P_{\max} = 4\, W^{1/2} \text{ kt/sec}$$
$$t_{\max} = 0{,}032\, W^{1/2} \text{ sec}$$
$$E_{\text{tot}} = {}^1/_3\, W \text{ kt.}$$

Hierbei ist

$t_{\max}$ = die Zeit nach der Explosion für das Temperaturmaximum im zweiten Wärmeimpuls;

$P_{\max}$ = die maximale Geschwindigkeit (bei $t_{\max}$) der Wärmeenergieausstrahlung aus dem Feuerball;

E_{tot} = gesamte von dem Feuerball ausgestrahlte Wärmeenergie.

Beispiel:

Gegeben: eine 500-kt-Explosion.

Suche: a) die Ausstrahlungsgeschwindigkeit der Wärmeenergie;

b) die Menge der innerhalb 2 Sekunden nach der Explosion ausgestrahlten Wärmeenergie.

Lösung: Da $W = 500$ kt ist, ist der Wert von $W^{1/2} = 22{,}4$, so daß $t_{\max} = 0{,}032 \times 22{,}4 = 0{,}72$ Sekunden ist. Die umgerechnete Zeit 2 Sekunden nach der Explosion ist

$$t/t_{\max} = 2{,}0/0{,}72 = 2{,}8.$$

a) Nach Bild 7.111 beträgt der Wert von $P/P_{\max}$ zu dieser umgerechneten Zeit 0,26, und da $P_{\max} = 4 \times 22{,}4 = 90$ kt/sec ist, so ist

$$P = 0{,}26 \times 90 = 23 \text{ kt/sec}$$
$$= 23 \times 10^{12} \text{ cal/sec.}$$

b) Zu der umgerechneten Zeit von 2,8 beträgt der Wert von E/E_{tot} nach Bild 7.111 58%, d. h. 0,58.

$$E_{\text{tot}} = {}^1/_3 \times 500 = 167 \text{ kt.}$$

Also ist

$$E = 0{,}58 \times 167 = 97 \text{ kt}$$
$$= 97 \times 10^{12} \text{ cal.}$$

7.111 Die Leistung P wird direkt als Funktion der Zeit t für jede Explosion gemessen. Jedoch wird, anstatt P in Abhängigkeit von der Zeit darzustellen, eine Kurve der umgerechneten Leistung gezeichnet, d. h. $P/P_{\max}$ in Abhängigkeit von der umgerechneten Zeit, d. h. $t/t_{\max}$, wobei $P_{\max}$ der maximale Wert der Wärmeleistung entsprechend dem Temperaturmaximum im zweiten Impuls und $t_{\max}$ die Zeit ist, in welcher dieses Maximum erreicht wird. Die sich ergebende Kurve (linke Skala) in Bild 7.111 ist dann allgemein anwendbar ohne Rücksicht auf den Explosionswert.

7.112 Um die Leistung-Zeit-Kurve für jeden Explosionswert anwendbar zu machen, muß man die entsprechenden Werte von P_{max} und t_{max} kennen. Diese werden auf folgende Weise zu dem Explosionswert von W kt in Beziehung gebracht:

$$P_{max} = 4\, W^{1/2}\, \text{kt/sec}, \quad \text{und} \quad t_{max} = 0{,}032\, W^{1/2}\, \text{sec}.$$

Die Anwendung dieser Gleichung ist in dem Beispiel neben Bild 7.111 dargestellt.

7.113 Die Menge der vom Feuerball in einer gegebenen Zeit emittierten Wärmeenergie E erhält man aus dem Raum unter der Kurve von P in Abhängigkeit von t bis zu dieser Zeit. Das Ergebnis, ausgedrückt in Prozent als E/E_{tot} in Abhängigkeit von t/t_{max}, ist in der zweiten Kurve (rechte Skala) in Bild 7.111 dargestellt. Die Größe E_{tot} ist die gesamte vom Feuerball emittierte Wärmeenergie; sie wird zum Explosionswert W kt in Beziehung gesetzt durch die Gleichung

$$E_{tot}\,(\text{Kilotonnen}) = {}^1/_3\, W \tag{7.113.1}$$

die von bei einer Anzahl von Versuchsexplosionen durchgeführten Messungen abgeleitet wurde. Diese Gleichung gibt die Wärmeenergie in Kilotonnen TNT an; wird sie jedoch in Kalorien benötigt, so muß man das Ergebnis mit 10^{12} multiplizieren.

7.114 Die Kurven in Bild 7.111 weisen einige Merkmale von besonderem Interesse auf. Wie zu erwarten, steigt die Wärmeleistung (oder die Emissionsgeschwindigkeit der Strahlungsenergie) des Feuerballes auf ein Maximum an, so wie dies auch bei der Temperatur im zweiten Strahlungsimpuls der Fall ist.

Da jedoch die Wärmeleistung ungefähr proportional T^4 ist, steigt und fällt sie viel rascher als die Temperatur. Das erklärt den scharfen Anstieg der P/P_{max}-Kurve auf das Maximum, dem ein etwas weniger scharfes Abfallen folgt, das sich vermindert, wenn der Feuerball sich seinen Endstadien nähert.

7.115 Vom Gesichtspunkt des Schutzes gegen Hautverbrennungen durch Abwehrbewegung ist t_{max} die bedeutende Größe, da die Geschwindigkeit der thermischen Strahlungsemission aus dem Feuerball dann maximal ist. Wir sehen aus dem Verhältnis in Abschn. 7.112, daß diese Zeit proportional zur Quadratwurzel des Explosionswertes zunimmt. Somit beträgt t_{max} bei einer 10-kt-Explosion etwa 0,1 Sekunden, jedoch bei einer Explosion von 10 Megatonnen beträgt sie mehr als 3 Sekunden. Bei Entfernungen, in denen schwere Verbrennungen zu erwarten wären, hätte eine Abwehrbewegung wahrscheinlich bei höheren Explosionswerten einen verhältnismäßig größeren Erfolg.

Verhältnis der Wärmeenergie zur Entfernung

7.116 Der nächste zu erörternde Punkt ist die Veränderung der je cm^2 eines Zielmaterials empfangenen gesamten Wärmeenergie (in Kalorien) mit der Entfernung von der Explosion. Wie in diesem Kapitel bereits festgestellt, können durch solche Ermittlungen zusammen mit den Angaben aus Tabelle 7.45, 7.61 und 7.65 die voraussichtlichen Bereiche verschiedener thermischer Strahlenwirkungen errechnet werden.

7.117 Wenn keine Abschwächung durch die Atmosphäre erfolgt, kann die Wärmeenergie E_{tot} in einer Entfernung D von der Explosion als einheitlich über die Oberfläche eines Flächenbereiches $4\pi D^2$ verteilt angesehen werden. Wenn eine Abschwächung lediglich auf Grund von Absorption erfolgte, wäre dieser Wert mit dem Faktor e^{-kD} zu multiplizieren, wobei k ein über das ganze Wellenlängenspektrum gleichmäßig verteilter Absorptionskoeffizient ist. Demnach ist in diesem Falle, wenn das Zeichen Q für die je Flächeneinheit in der Entfernung D von der Explosion empfangene Wärmeenergie gewählt wird,

$$Q = \frac{E_{\text{tot}}}{4\pi D^2} e^{-kD}.$$

Da nach den Ergebnissen aus Abschn. 7.112 $E_{\text{tot}} = {}^1/_3\, W \times 10^{12}$ Kalorien ist, wobei W der Explosionswert in Kilotonnen ist, wäre die entsprechende Gleichung folgende:

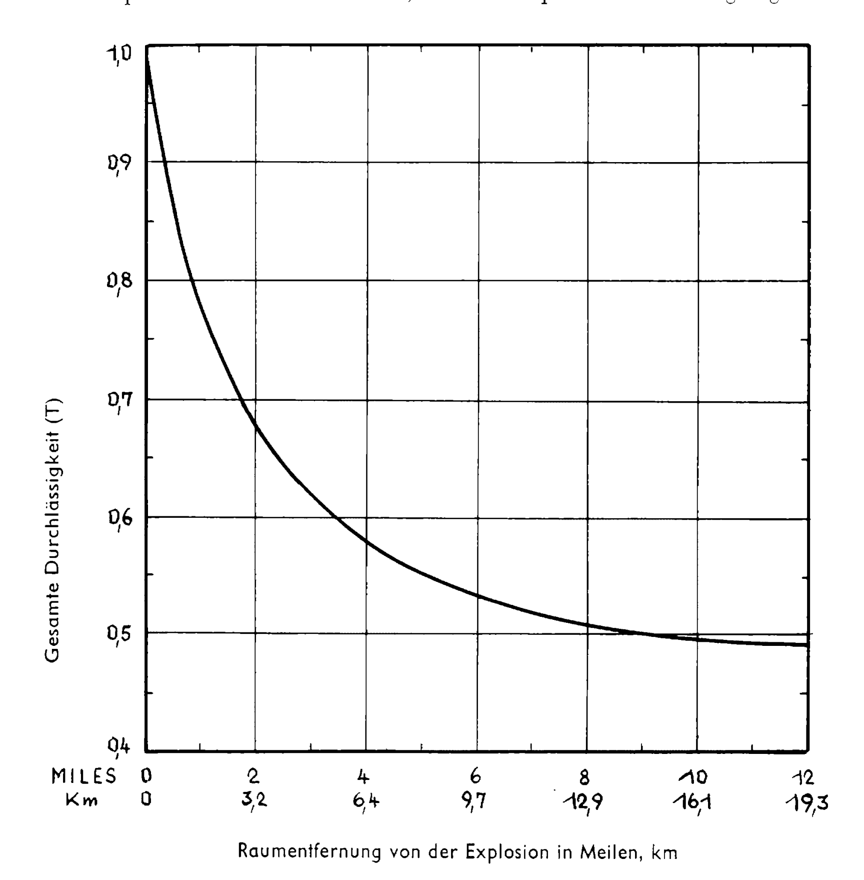


Bild 7.118 Gesamte Durchlässigkeit bei 6000° K schwarze Strahlungsquelle (16 km Sicht, 10 g/m³ Wasserdampfkonzentration)

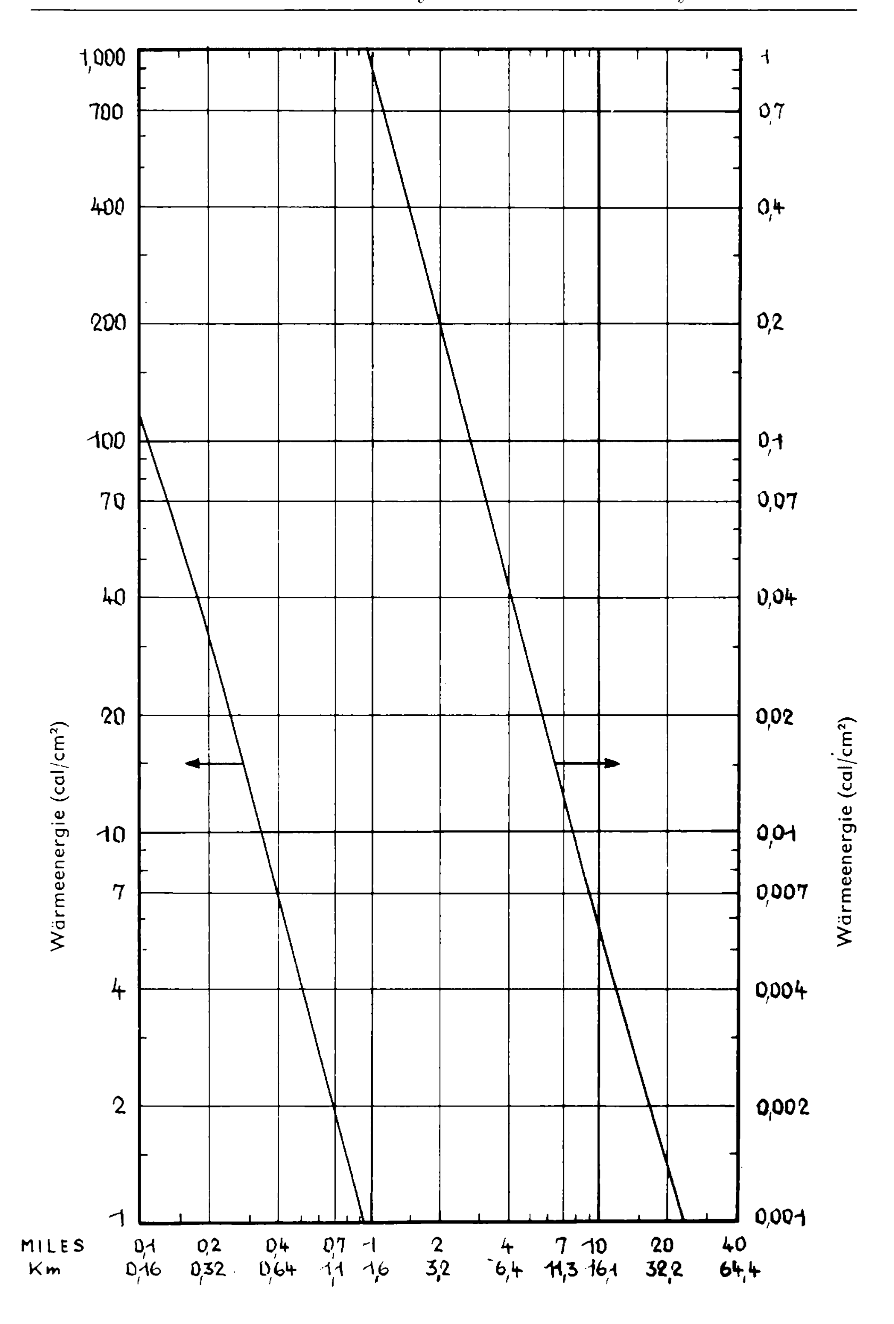


Bild 7.119 Empfangene Wärmeenergie in verschiedenen Raumentfernungen bei Luftexplosion von 1 kt bei Sichtweiten von 3–80 km)

$$Q(\text{cal/cm}^2) = \frac{10^{12}\,W e^{-kD}}{12\,D^2}$$

wobei die Entfernung D in cm lautet.

7.118 Erfolgt außer der Absorption eine Streuung der Strahlung, dann ist der Koeffizient k keine Konstante mehr, sondern eine Funktion der Entfernung; es ist dann nicht mehr angebracht, die Abschwächung durch einen Potenzfaktor auszudrücken. Eine zweckmäßigere Formulierung wird dargestellt durch

$$Q(\text{cal/cm}^2) = \frac{10^{12}\,W\,T}{12\pi D^2} \tag{7.118.1}$$

Hierbei ist T die Durchlässigkeit (Transmissionsfaktor), d. h. der Teil der durchgelassenen Strahlung, eine komplexe Funktion der Sicht (Streuung), Absorption und Entfernung. Die Veränderung von T mit der Entfernung von der Explosion ist aus der Kurve in Bild 7.118 ersichtlich. Diese Kurve war eigentlich für eine Sicht von 16 km und für Luft mit einer Wasserdampfkonzentration (welche die Absorption bestimmt) von 10 g/m³ berechnet. Die Berechnungen für andere annehmbare atmosphärische Verhältnisse haben zu Ergebnissen geführt, die sich von den in Bild 7.118 aufgezeigten nicht wesentlich unterschieden, und es scheint, daß die gleiche Durchlässigkeitskurve in allen Fällen ohne größere Fehler verwendet werden kann, vorausgesetzt, daß die Entfernungen nicht größer sind als die halbe Sichtweite.

7.119 Um die Anwendung der Gleichung 7.118.1 zu vereinfachen, sind die Werte für Q für verschiedene Entfernungen D von der Explosion für $W = 1$ kt in Bild 7.119 aufgetragen. Die in einer beliebigen Entfernung von der Explosion von W kt empfangene thermische Strahlung erhält man dann, indem man die Wärmeenergie für die gleiche Entfernung in Bild 7.119 mit W multipliziert.

Blitzverbrennungsenergie und Gesamtexplosionswert

7.120 Da t_{max} mit dem Gesamtexplosionswert zunimmt, ist es klar, daß eine gegebene Menge thermischer Strahlungsenergie aus einer Explosion von geringem Explosionswert in kürzerer Zeit empfangen wird als aus einer Explosion von höherem Explosionswert. Es ist also zu erwarten, daß die zur Erzeugung von Blitzverbrennungen irgendeiner bestimmten Art erforderliche Wärmeenergie mit dem Explosionswert zunimmt, wie an anderer Stelle bereits ausgeführt. Auf Grund von Labormessungen, Beobachtungen bei Kernversuchen und theoretischen Berechnungen sind die zur Erzeugung mittlerer Verbrennungen ersten, zweiten und dritten Grades erforderlichen Wärmeenergiemengen als Funktion des Explosionswertes berechnet worden. Die Ergebnisse sind in Bild 7.120 aufgeführt.

7.121 Die Kurven in Bild 7.47 entstanden durch Vereinigung dieser Daten mit denen, die vorstehend für die Veränderung der empfangenen Wärmeenergie mit der

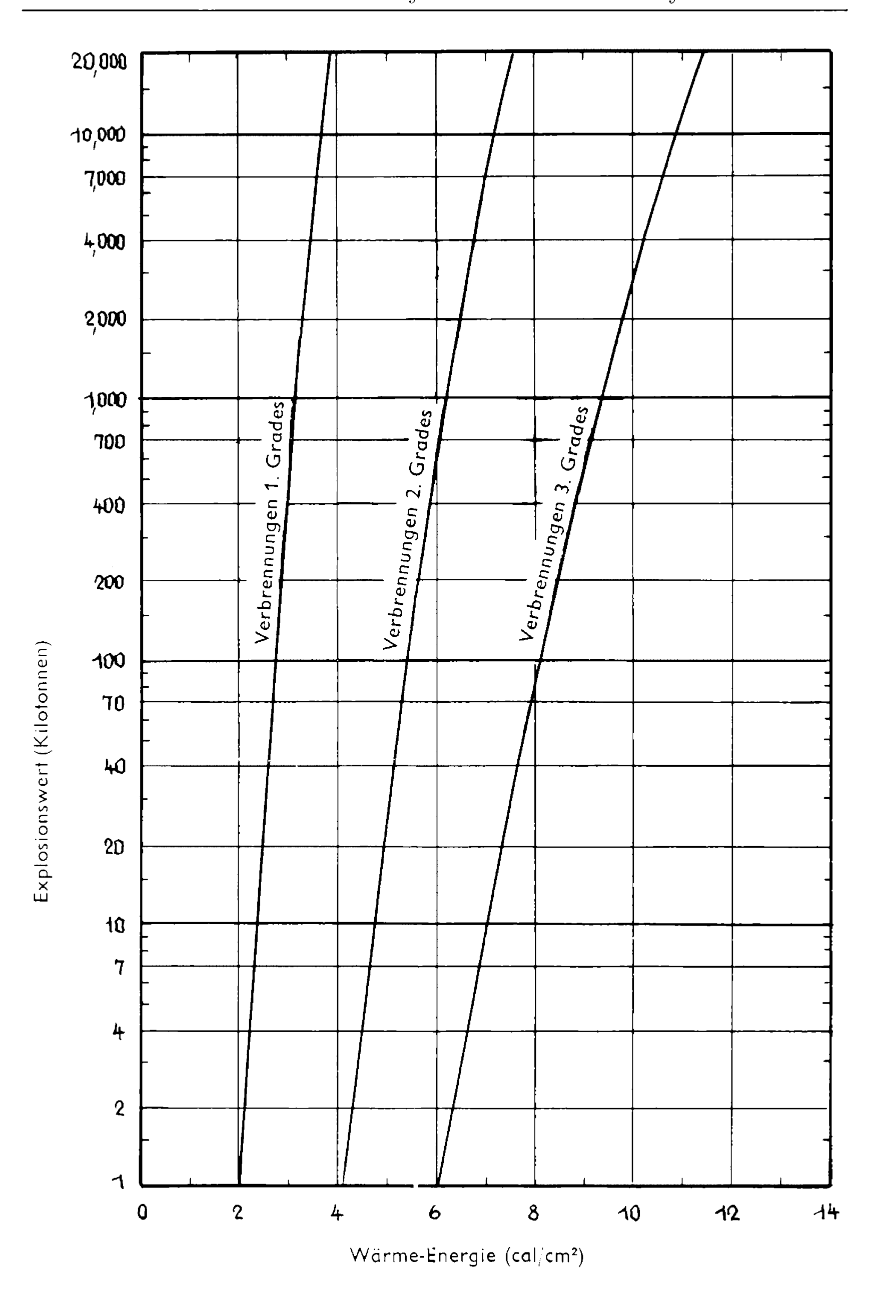


Bild 7.120 Für Verbrennungen auf ungeschützter Haut erforderliche Wärmeenergie

Entfernung von einer Explosion von gegebenem Explosionswert abgeleitet wurden. So wurde in dem Beispiel neben Bild 7.119 festgestellt, daß in einer Entfernung von 4,8 km von einer 100-kt-Luftexplosion die empfangene Wärmeenergie 8 cal/cm² beträgt. Aus Bild 7.120 ist ersichtlich, daß die Menge Wärmeenergie aus einer 100-kt-Explosion wahrscheinlich Verbrennungen dritten Grades hervorrufen würde.

Zu Bild 7.119 Die Kurve, die zwecks besserer Darstellung in zwei Teilen aufgetragen ist, zeigt die Wärmeenergiemenge (in Kalorien je cm²) in verschiedenen Entfernungen von einer 1-kt-Luftexplosion bei atmosphärischer Sichtweite von 3–80 km.

Umrechnung: Die in einer bestimmten Entfernung von einer Wkt-Explosion empfangene Wärmeenergie ist W mal den Wert für die gleiche Entfernung von einer 1-kt-Explosion.

Beispiel:

Gegeben: Eine 100-kt-Luftexplosion und eine Sicht von 16 km.

Suche: die Menge der in einer Entfernung von 4,8 km von der Explosion empfangenen Wärmeenergie.

Lösung: Nach Bild 7.119 beträgt die Menge der in einer Entfernung von 4,8 km von einer 1-kt-Luftexplosion empfangenen Wärmeenergie 0,08 cal/cm². Also beträgt die in einer Entfernung von 4,8 km von einer 100-kt-Luftexplosion empfangene Wärmeenergie

$$100 \times 0{,}08 = 8 \text{ cal/cm}^2.$$

KAPITEL VIII

Die Anfangsstrahlung

Das Wesen der nuklearen Strahlungen

Neutronen und Gammastrahlen

8.1 In Kap. I war gesagt, daß eines der bedeutendsten Merkmale einer Kernexplosion die Tatsache ist, daß sie von der Emission von nuklearen (oder Kern-)Strahlen begleitet wird. Diese Strahlung, die sich stark von der im vorhergehenden Kapitel erörterten thermischen Strahlung unterscheidet, besteht aus Gammastrahlen, Neutronen, Betateilchen und einem kleinen Prozentsatz Alphateilchen. Der größte Teil der Neutronen und einige der Gammastrahlen werden bei dem eigentlichen Spaltungsprozeß emittiert, d. h. gleichzeitig mit der Explosion, während die Betateilchen und der Rest der Gammastrahlen freiwerden, wenn die Spaltungsprodukte zerfallen. Einige der Alphateilchen entstehen durch den normalen radioaktiven Zerfall des Urans oder Plutoniums, das der Spaltung in dem Sprengkörper entgangen ist, und andere (Heliumkerne) werden bei den Wasserstoffverschmelzungsvorgängen gebildet (Abschn. 1.55).

8.2 Wegen der Natur der mit einer Kernexplosion in der Luft oder nahe der Erd- oder Wasseroberfläche verbundenen Vorgänge ist es aus praktischen Gründen angebracht, die Kernstrahlungen in zwei Kategorien eingeteilt zu erörtern, und zwar Anfangs- und Rückstandsstrahlung (Abschn. 1.2). Die Grenzlinie zwischen diesen beiden Strahlungskategorien ist etwas willkürlich gezogen, sie kann aber aus den in Abschn. 2.39 angeführten Gründen als eine Minute nach der Explosion angenommen werden. Die in diesem Kapitel behandelte Anfangsstrahlung ist also die innerhalb einer Minute nach der Explosion emittierte Strahlung. Bei Untererd- oder Unterwasserexplosionen ist es weniger von Bedeutung, zwischen Anfangs- und Rückstandsstrahlung zu unterscheiden (Abschn. 2.64, 2.74), obwohl ein solcher Unterschied nach Belieben gemacht werden kann.

8.3 Die Reichweite der Alpha- und Betateilchen ist verhältnismäßig gering; bei einer Luftexplosion können sie den Erdboden nicht erreichen. Selbst wenn der Feuerball den Erdboden berührt, sind die Alpha- und Betateilchen nicht sehr von Bedeutung. Die Anfangsstrahlung kann deshalb als nur aus Gammastrahlen und Neutronen bestehend angesehen werden, die während des Zeitraums von einer Minute nach der Kernexplosion erzeugt werden. Obwohl diese beiden Kernstrahlungen in ihrem Wesen unterschiedlich sind, können sie doch bedeutende Entfernungen in der Luft zurücklegen. Außerdem können sowohl Gammastrahlen als auch Neutronen gefährliche Wirkungen an lebendem Organismus hervorrufen (s. Kap. XI).

Der hochgefährliche Charakter dieser Kernstrahlungen sowie ihr großer Wirkungsbereich machen sie zu einem bedeutsamen Faktor der Kernexplosion.

8.4 Der größte Teil der bei dem eigentlichen Spaltungsprozeß auftretenden Gammastrahlen wird von dem Sprengkörpermaterial absorbiert und dabei in andere Energiearten umgewandelt. So kann nur ein kleiner Bruchteil (etwa 1%) dieser Gammastrahlung eine größere Entfernung von dem explodierenden Sprengkörper zurücklegen; wie wir aber bald sehen werden, sind noch mehrere andere Gammastrahlungsquellen vorhanden, die ein Bestandteil der Anfangsstrahlung sind. Ebenso werden die bei der Spaltung erzeugten Neutronen weitgehend durch Sprengkörperüberreste oder durch die von der Stoßfront erfaßte Luft verlangsamt und aufgefangen. Trotzdem entweicht eine Anzahl schneller (Spaltungs-)Neutronen aus dem Explosionsbereich, die auf bedeutende Entfernungen eine große Gefahr darstellen. Obwohl die Energie der Gammastrahlen und Neutronen nur etwa 3% des gesamten Explosionswertes beträgt im Vergleich zu mehr als 33%, die als thermische Strahlung auftreten, können die Kernstrahlungen einen großen Teil der Verluste durch den Atomsprengkörper verursachen.

Vergleiche zwischen den Strahlungen aus Atomsprengkörpern

8.5 Wie wir in Kap. VII gesehen haben, ist der Schutz gegen die thermische Strahlung in nicht zu geringen Entfernungen von der Explosion eines Atomsprengkörpers eine ziemlich einfache Angelegenheit. Dies gilt jedoch nicht für Gammastrahlen und Neutronen. Die Anfangsstrahlung würde z. B. in einer Entfernung von 1,6 km vom Explosionspunkt eines 1-Megatonnen-Atomsprengkörpers wahrscheinlich bei 50% der Bevölkerung tödlich wirken, selbst wenn sie durch 60 cm Beton geschützt wären. Gegen die thermische Strahlung würde dagegen eine viel geringere Abschirmung an derselben Stelle einen vollständigen Schutz bieten. Die Probleme der Abschirmung gegen thermische und Kernstrahlungen sind also ganz klar erkennbar.

8.6 Die tatsächlichen Schadensbereiche dieser beiden Arten von Strahlungen aus Atomsprengkörpern können sehr verschieden sein. Bei Explosionen von mittlerem und hohem Explosionswert kann die thermische Strahlung in viel größeren Entfernungen schädlich wirken als die Anfangsstrahlung. Bei Entfernungen von mehr als etwa 2250 m würde die Anfangsstrahlung, z.B. aus einer 20-kt-Explosion, selbst ohne schützende Abschirmung keine feststellbaren Schäden verursachen. Jedoch würde die Einwirkung der thermischen Strahlung in dieser Entfernung schwere Hautverbrennungen verursachen. Wenn dagegen der Explosionswert der Kern-Explosion verhältnismäßig gering ist, z. B. 1 kt oder weniger, dann hat die Anfangsstrahlung den größeren Wirkungsbereich.

8.7 Bei der Erörterung der Merkmale der Anfangsstrahlung ist es zweckmäßig, die Neutronen und die Gammastrahlen getrennt zu behandeln. Obwohl ihre Endwirkung auf den lebenden Organismus weitgehend die gleiche ist, unterscheiden sich

die beiden Arten der Kernstrahlung doch in vielen Punkten. Das Thema der Gammastrahlen wird in dem folgenden Abschnitt behandelt, während die Neutronen weiter unten in diesem Kapitel erörtert werden.

Gammastrahlen

Die Quellen der Gammastrahlen

8.8 Außer den Gammastrahlen, die den eigentlichen Spaltungsprozeß begleiten, sind Gammastrahlen aus anderen Quellen ein Bestandteil der Anfangsstrahlungen. Von den bei der Spaltung erzeugten Neutronen dienen einige zur Auslösung der Spaltungskettenreaktion; andere dagegen entweichen, jedoch wird ein großer Teil der Spaltungsneutronen auf jeden Fall von den nichtspaltbaren Kernen eingefangen. Hierbei wird der Kern in den sog. »Kompoundkern« umgewandelt, der sich im Zustand hoher Energie (oder Anregungszustand) befindet. Die überschüssige Energie kann dann fast augenblicklich als Gammastrahlung emittiert werden. Diese Strahlen werden »eingefangene Gammastrahlen« genannt, da sie durch das Einfangen eines Neutrons durch einen Kern entstehen. Der Prozeß wird dementsprechend als »Strahlungseinfang« bezeichnet.

8.9 Die bei der Spaltung erzeugten Neutronen können mit den im Atomsprengkörper vorhandenen Kernen verschiedener Materialien sowie mit denen des in der umgebenden Atmosphäre vorhandenen Stickstoffs Strahlungseinfangreaktionen ausgesetzt sein. Diese Reaktionen sind von Gammastrahlen begleitet, die ein Bestandteil der Anfangsstrahlung sind. Das Zusammenwirken mit den Stickstoffkernen ist von besonderer Bedeutung, da einige der dadurch erzeugten Gammastrahlen hochenergiehaltig sind und infolgedessen viel leichter abgeschwächt werden als die übrigen Bestandteile der Gammastrahlen in der Anfangsstrahlung.

8.10 Das Zusammenwirken der Spaltungsneutronen mit den Atomkernen schafft eine neue Gammastrahlenquelle. Wenn ein schnelles Neutron, d. h. ein Neutron mit einer großen Menge kinetischer Energie, mit einem Kern zusammenstößt, dann kann das Neutron einen Teil seiner Energie an den Kern übertragen und ihn in angeregten (hochenergiehaltigen) Zustand bringen. Der angeregte Kern kann dann durch Emission von Gammastrahlen wieder zu seinem normalen Energiezustand (oder Grundzustand) zurückkehren.

8.11 Die bei der Spaltung und durch andere Neutronenreaktionen und nukleare Anregung der Sprengkörpermaterialien erzeugten Gammastrahlen treten alle innerhalb einer Sekunde (oder weniger) nach der Kernexplosion auf. Aus diesem Grunde nennt man die Strahlungen aus diesen Quellen die »prompten« oder »momentanen« Gammastrahlen.

8.12 Die Spaltungsfragmente und viele ihrer Zerfallsprodukte sind radioaktive Isotope, die Gammastrahlen emittieren (s. Kap. I). Die Halbwertszeiten dieser radio-

aktiven Elementarten liegen zwischen einer Millionstelsekunde (oder weniger) und vielen Jahren. Trotzdem erfolgt, da der Zerfall der Spaltungsprodukte im Augenblick der Spaltung beginnt und da ihre Zerfallsgeschwindigkeit zu Anfang am größten ist, aus diesen Radioisotopen in der ersten Minute nach der Explosion eine bedeutende Freimachung von Gammastrahlen. Mit anderen Worten: die von den Spaltungsprodukten emittierten Gammastrahlen tragen wesentlich zu der Anfangsstrahlung bei. Da jedoch der radioaktive Zerfallsprozeß ein fortlaufender (oder allmählicher) Prozeß ist, der sich über einen Zeitraum erstreckt, der lang ist im Vergleich zu dem Zeitraum, in welchem die »momentane« Strahlung erzeugt wird, werden die sich hierbei ergebenden Gammastrahlen als »verzögerte« Gammastrahlen bezeichnet.

8.13 Die momentanen Gammastrahlen und der Teil der verzögerten Gammastrahlen, der in der Anfangsstrahlung enthalten ist, sind mengenmäßig ungefähr gleich, jedoch sind sie keineswegs gleiche Bruchteile der Anfangsstrahlung, die aus dem explodierenden Sprengkörper übertragen wird. Die momentanen Gammastrahlen werden fast gänzlich erzeugt, bevor der Atomsprengkörper völlig auseinandergesprengt ist. Sie werden deshalb von dem dichten Sprengkörpermaterial stark absorbiert, und nur ein kleiner Bruchteil davon wird wirksam. Die verzögerten Gammastrahlen dagegen werden zum größten Teil in einem späteren Stadium der Explosion emittiert, nachdem die Sprengkörpermaterialien verdampft sind und sich als dünne Gase ausgedehnt haben. Diese Strahlungen werden also wenig oder gar nicht absorbiert, bevor sie in die Luft übergehen. Im Endergebnis tragen die verzögerten Gammastrahlen zusammen mit denen, die durch den Strahlungsauffang von Neutronen durch den Stickstoff in der Luft erzeugt werden, etwa 100 mal so viel wie die »prompten« Gammastrahlen zu der gesamten Kernstrahlung bei, die in einer Entfernung von einer Luft- (oder Boden-)Explosion während der ersten Minute nach der Explosion empfangen wird.

8.14 Zu erwähnen ist noch eine andere mögliche Gammastrahlenquelle. Wenn eine Kernexplosion in der Nähe der Erdoberfläche erfolgt, können die emittierten Neutronen die sog. »induzierte Radioaktivität« in den im Erdboden vorhandenen Stoffen verursachen. Hierbei können Strahlungen auftreten, die ein Teil der verzögerten Gammastrahlen sind. Da die induzierte Radioaktivität ein Faktor der Rückstandsstrahlung ist, wird sie im nächsten Kapitel noch ausführlicher behandelt.

Messung der Gammastrahlungen

8.15 Die thermische Strahlung aus einer Kernexplosion kann man (als Wärme) fühlen, und der im sichtbaren Bereich des Spektrums liegende Teil kann auch gesehen werden. Die menschlichen Sinnesorgane reagieren jedoch auf Kernstrahlungen nur bei sehr starker Intensität (oder Dosis), wenn ein Jucken und Brennen der Haut fühlbar wird. Es sind deshalb besondere Meßmethoden, die auf der Einwirkung dieser Strahlung auf die Materie beruhen, zum Ermitteln und Messen verschiedener Kernstrahlungen entwickelt worden.

8.16 Wenn Gammastrahlen einen festen, flüssigen oder gasförmigen Stoff durchdringen, wirken sie auf die Atome auf verschiedene Weise ein. In bezug auf die Messung der Gammastrahlendosis sind zwei Endergebnisse dieser Einwirkungen von Bedeutung. Das eine Ergebnis liegt darin, daß von vielen Atomen ein Elektron ausgestoßen wird. Da das Elektron eine elektrisch negative Ladung enthält, ist der restliche Teil des Atoms positiv geladen, d. h. es ist ein positives Ion. Dieser Prozeß wird »Ionisierung« genannt, und die abgetrennten Elektronen und positiven Ionen werden »Ionenpaare« genannt.

8.17 Das zweite Ergebnis der Gammastrahleneinwirkungen entsteht unmittelbar in bestimmten festen und flüssigen Stoffen sowie in Gasen. Das Elektron wird nicht, wie bei der Ionisierung, vollständig von dem Atom getrennt, sondern es empfängt einen zusätzlichen Energiebetrag. Dadurch wird das Atom in einen hochenergetischen (oder angeregten) elektronischen Zustand gebracht. Diesen Vorgang nennt man »Anregung«.

8.18 Sowohl die Ionisierung als auch die Anregung sind für den Nachweis oder die Messung von Gammastrahlen und anderen Kernstrahlungen verwendet worden. Im allgemeinen leitet ein Gas die Elektrizität nicht nennenswert, aber durch die Bildung von Ionenpaaren durch die Kernstrahlung wird das Gas zu einem ziemlich guten Leiter. Mehrere Arten von Geräten zur Messung von Gamma- und anderen Strahlen, z. B. der Geigerzähler und der Taschenzähler (oder Dosimeter), basieren auf der Bildung elektrisch geladener Ionenpaare in einem Gas und seiner sich daraus ergebenden Fähigkeit, Elektrizität zu leiten.

8.19 Die Anwendung von Scintillationszählern hängt dagegen von der Anregung ab. Wenn ein Atom oder Molekül angeregt wird, gibt es im allgemeinen die überschüssige (oder Anregungs-)Energie innerhalb einer Millionstelsekunde ab. Bestimmte Materialien – meist solche in festem oder flüssigem Zustand – können ihre elektronische Anregungsenergie in Form sichtbarer Lichtblitze oder Scintillationen abgeben. Diese Scintillationen können mit einem Photomultiplier und den zugehörigen elektronischen Geräten gezählt werden.

8.20 Außer den direkten Ionisierungs- und Anregungswirkungen, wie sie vorstehend beschrieben sind, zeigen sich noch einige indirekte Ergebnisse, insbesondere chemische Veränderungen. Ein Beispiel hierfür ist das Schwarzwerden oder Verschleiern von photographischen Filmen, welches sich nach dem Entwickeln zeigt. Die Filme zum Messen von Kernstrahlen enthalten für gewöhnlich zwei oder drei Filmschichten, ähnlich wie sie von Zahnärzten für Röntgenaufnahmen verwendet werden. Sie werden in Papier (oder anderes dünnes Material) eingewickelt, welches lichtundurchlässig ist, aber von Gammastrahlen leicht durchdrungen wird. Die Filme werden entwickelt, und der Grad der beobachteten Schleierbildung ist ein Maßstab für die Gammastrahlenaufnahme. Außerdem sind selbstanzeigende chemische Dosimeter in einem vorgeschrittenen Entwicklungsstadium. Mit diesen Geräten kann die Kernstrahlungsaufnahme direkt durch Beobachtung der Farbveränderungen bei bestimmten, durch Strahlung induzierten chemischen Reaktionen festgestellt werden.

Strahlungseinheiten: das Röntgen

8.21 Um die Gammastrahlungsaufnahme an einem bestimmten Punkt darzustellen, braucht man eine geeignete Maßeinheit. Die in diesem Zusammenhang verwendete Maßeinheit wird das »Röntgen« genannt. Sein Wert liegt darin, daß die Stärke der empfangenen Dosis in Röntgen zu den sich aus der Strahlung ergebenden und zu erwartenden biologischen Wirkungen (oder Schäden) in Beziehung gesetzt werden kann.

8.22 Es wird allgemein angenommen, daß die schädlichen Wirkungen von Kernstrahlungen am lebenden Organismus größtenteils auf der chemischen Auflösung der in den tierischen (oder pflanzlichen) Zellen vorhandenen Moleküle beruhen. Im Grunde ist die Ionisierung (und Anregung), die durch die Kernstrahlungen verursacht wird, für diese chemische Reaktion verantwortlich. Deshalb scheint der Umfang der Ionisierung oder die Zahl der Ionenpaare, die durch die Strahlung erzeugt wird, eine Grundlage für die Messung zu bilden. Obwohl die eigentliche Definition etwas verwickelter ist, ist das Roentgen die Menge Gamma-(oder Röntgen-)Strahlen, die $1{,}61 \times 10^{12}$ Ionenpaare bilden, wenn sie in 1 Gramm Luft absorbiert werden. Die Absorption von 1 Röntgen führt zum Freiwerden der Energie von etwa 87 erg je Gramm Luft.

8.23 Die Strahlungsmeßgeräte zeigen die Zahl der Röntgen nicht direkt an. Jedoch können die beobachteten Mengen, z. B. elektrische Impulse, Scintillationen oder das Verschleiern eines photographischen Films, durch geeignete Anordnung eine Messung der Strahlungsaufnahme in Röntgen ermöglichen. Deshalb werden die verschiedenen Strahlungsmeßgeräte mit einer Standard-Gammastrahlenquelle geeicht. Hierfür wird im allgemeinen eine bekannte Menge von radioaktivem Kobalt oder Radium verwendet. Die Aufnahme an Gammastrahlen in Röntgen in einer bestimmten Entfernung von einer solchen Quelle in der Luft ist aus Messungen mit besonderen Laborgeräten, die für die Anwendung im Einsatz nicht geeignet sind, bekannt.

8.24 Zwei Arten von Messungen, die beide weit verbreitet sind, werden mit Strahlungsgeräten durchgeführt. Einige dieser Geräte zeigen die gesamte Strahlungsdosis (oder Menge) in Röntgen an, die während einer bestimmten Einwirkungszeit empfangen wurde. Andere Geräte wieder zeigen die Dosisleistung in Röntgen je Stunde oder, bei kleineren Dosen, in Milliröntgen je Stunde an, wobei ein Milliröntgen der tausendste Teil eines Röntgens ist. Die Gesamtdosis ist gleich der richtig gemittelten Dosisleistung, multipliziert mit der Einwirkungszeit.

8.25 Obwohl manche Spezialgeräte sowohl die gesamte Strahlungsdosis als auch die Dosisleistung anzeigen, sind doch die meisten Strahlungsmeßgeräte so konstruiert, daß sie die eine oder die andere anzeigen. Bezüglich der Anfangsstrahlung ist die Gesamtdosis die bedeutsame Größe, aber im Zusammenhang mit der verzögerten Strahlung, die in Kap. IX näher behandelt ist, sind sowohl die Dosisleistung als auch die Gesamtdosis von Bedeutung.

8.26 Die biologischen Wirkungen verschiedener Gammastrahlendosen sind ausführlicher in Kap. XI behandelt. Um jedoch einige Angaben über die Bedeutung der

weiter unten angeführten Zahlen zu liefern, mag erwähnt werden, daß eine Einzeldosis von weniger als 25 Röntgen keine feststellbaren gesundheitlichen Auswirkungen hat. Größere Dosen haben zunehmend stärkere Auswirkungen, und es ist anzunehmen, daß eine Einwirkung von 450 Röntgen auf den ganzen Körper innerhalb eines Zeitraums von etwa einem Monat auf etwa 50% der dieser Strahlung ausgesetzten Personen tödlich wirkt. Eine Einwirkung von 700 oder mehr Röntgen auf den ganzen Körper würde wahrscheinlich in nahezu allen Fällen tödlich sein.

8.27 Auf die im vorstehenden Abschnitt erwähnte Einwirkung auf den ganzen Körper ist besonders aufmerksam zu machen. Hierbei haben die Kern- und die thermischen Strahlungen etwas gemein: eine Verbrennung dritten Grades in einem begrenzten Bereich muß nicht unbedingt sehr gefährlich sein, aber eine Verbrennung zweiten Grades an einem großen Teil des Körpers kann tödlich wirken. Ebenso würde eine Dosis von 1000 oder mehr Röntgen Kernstrahlung auf einer kleinen Fläche örtliche Schäden verursachen, aber wahrscheinlich nur geringe Gesamtauswirkungen haben. Wenn der Körper ganz oder größtenteils der gleichen Anzahl Röntgen ausgesetzt würde, dann würde dies zweifellos den Tod zur Folge haben.

Das rad und das rem

8.28 Das Röntgen als Strahlungsdoseneinheit gilt für Gammastrahlen (oder Röntgenstrahlen), und zwar, genau gesagt, nur für diese. Ferner ist es auf jeden Fall mehr eine Maßeinheit für die Stärke des Strahlungsfeldes an einem gegebenen Punkt als eine Maßeinheit für die von einer Person an diesem Punkt absorbierte Strahlung. Die Strahlungsdosis in Röntgen wird deshalb auch als »Expositionsdosis« (oder Bestrahlungsdosis) bezeichnet. Um diese von der »absorbierten Dosis« zu unterscheiden, braucht man eine andere Einheit. Eine solche ist das »rep«; diese Bezeichnung ist aus den drei Anfangsbuchstaben des Ausdruckes »**R**oentgen-**E**quivalent-**P**hysical« zusammengesetzt.

8.29 In Abschn. 8.22 war gesagt, daß eine Gammastrahlen-(Expositions-)Dosis von 1 Röntgen gleich der Energieabsorption von etwa 87 erg je Gramm Luft ist. Danach wurde ein rep ursprünglich definiert als die Dosis *jeder beliebigen* Kernstrahlung (Gammastrahlen, Betateilchen, Neutronen usw.), die die Absorption dieser Energiemenge, d. h. 87 erg je Gramm tierischen Gewebes, zur Folge hat. Man hat jedoch festgestellt, daß bei Einwirkung einer Dosis von 1 Röntgen Gammastrahlung mehr als 97 erg in einem Gramm weichen Gewebes absorbiert wurden. Deshalb ist das rep zur Bezeichnung einer Dosis von 97 erg beliebiger Kernstrahlung, die je Gramm Gewebe absorbiert wird, verwendet worden.

8.30 Die vorstehende Definition des rep auf der Grundlage des Röntgen ist etwas unbefriedigend, da die Zahl der erg von dem Wert der zur Erzeugung eines Ionenpaares in der Luft erforderlichen Energie bestimmt wird. Diese Größe ist nicht mit Sicherheit bekannt, und nachdem neue Versuchsergebnisse vorlagen, wurde die Anzahl der erg in der Definition des rep abgeändert. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, ist eine neue Einheit für die Strahlungsabsorption eingeführt worden, das »rad«,

welches derartige Unzulänglichkeiten nicht aufweist. Das rad wird definiert als die absorbierte Dosis einer Kernstrahlung, bei der eine Energie von 100 erg je Gramm absorbierenden Materials frei wird. Bei weichem Gewebe ist der Unterschied zwischen dem rep und dem rad unbedeutend, und die vorher in rep ausgedrückten Zahlenwerte für die absorbierte Dosis bleiben im wesentlichen unverändert, wenn sie in rad umgewandelt werden.

8.31 Obwohl alle ionisierenden Strahlungen ähnliche biologische Wirkungen hervorrufen können, kann die in rad gemessene absorbierte Dosis, die eine bestimmte Wirkung verursacht, innerhalb der einzelnen Strahlungsarten sehr verschieden sein. Die Verschiedenartigkeit des Verhaltens wird hierbei durch eine Größe ausgedrückt, die »relativer biologischer Effekt« (oder RBE) der betreffenden Kernstrahlung genannt wird. Der RBE einer Strahlung wird definiert als das Verhältnis der absorbierten Dosis Gammastrahlen in rad (von bestimmter Energie) zu der absorbierten Dosis der Strahlung in rad bei gleicher biologischer Wirkung.

8.32 Der Wert des RBE bei einer bestimmten Art von Kernstrahlen hängt von mehreren Faktoren ab, z. B. von der Strahlungsenergie, der Art und dem Grad des biologischen Schadens, sowie der Natur des betreffenden Organismus oder Gewebes. In bezug auf Waffen sind die bedeutsamen Merkmale schwere Krankheit und Tod, und die »relativen biologischen Effekte« werden nach diesen Auswirkungen der Strahlungen aus einer Kernexplosion berechnet.

8.33 Nach der Erläuterung des Begriffes des »relativen biologischen Effektes« (RBE) ist es zweckmäßig, nun eine andere Einheit zu erläutern, das »rem« als Abkürzung für »**R**oentgen-**E**quivalent-**M**ammal (oder Man)« (= Roentgenäquivalent für Säugetiere oder Menschen). Das rem ist eine Maßeinheit für die Energieabsorption, sie berücksichtigt jedoch nicht die biologische Wirkung der betreffenden absorbierten Kernstrahlung. Das rem, welches definiert wird als Dosis in rem = RBE × Dosis in rad, gibt jedoch das Ausmaß der biologischen Schäden (bestimmter Art) an, die sich aus der Absorption von Kernstrahlen ergeben würden. Somit ist das rem eine Maßeinheit für die biologische Dosis, während das rad eine Maßeinheit für die absorbierte Dosis und das Röntgen eine Maßeinheit für die Bestrahlungsdosis ist. Entsprechend der in Abschn. 8.31 angeführten Definition hat der relative biologische Effekt (RBE) ungefähr den Wert 1, obwohl er sich mit der Strahlungsenergie etwas verändert. Also ist bei Gammastrahlung die biologische Dosis in rem zahlenmäßig gleichwertig mit der absorbierten Dosis in rad, und in Anbetracht der Ähnlichkeit zwischen rad und rep bei weichen Geweben ist sie auch ungefähr gleichwertig mit der Bestrahlungsdosis in Röntgen. Diese Übereinstimmung gilt natürlich nicht unbedingt für andere Kernstrahlungen.

Beziehung zwischen Gammastrahlendosis und Entfernung

8.34 Wie zu erwarten, ist die Gammastrahlen-Expositionsdosis an einem bestimmten Ort aus einer Kernexplosion um so geringer, je weiter dieser Ort von dem Explosionspunkt entfernt ist. Das Verhältnis der Strahlungsdosis zur Entfernung hängt

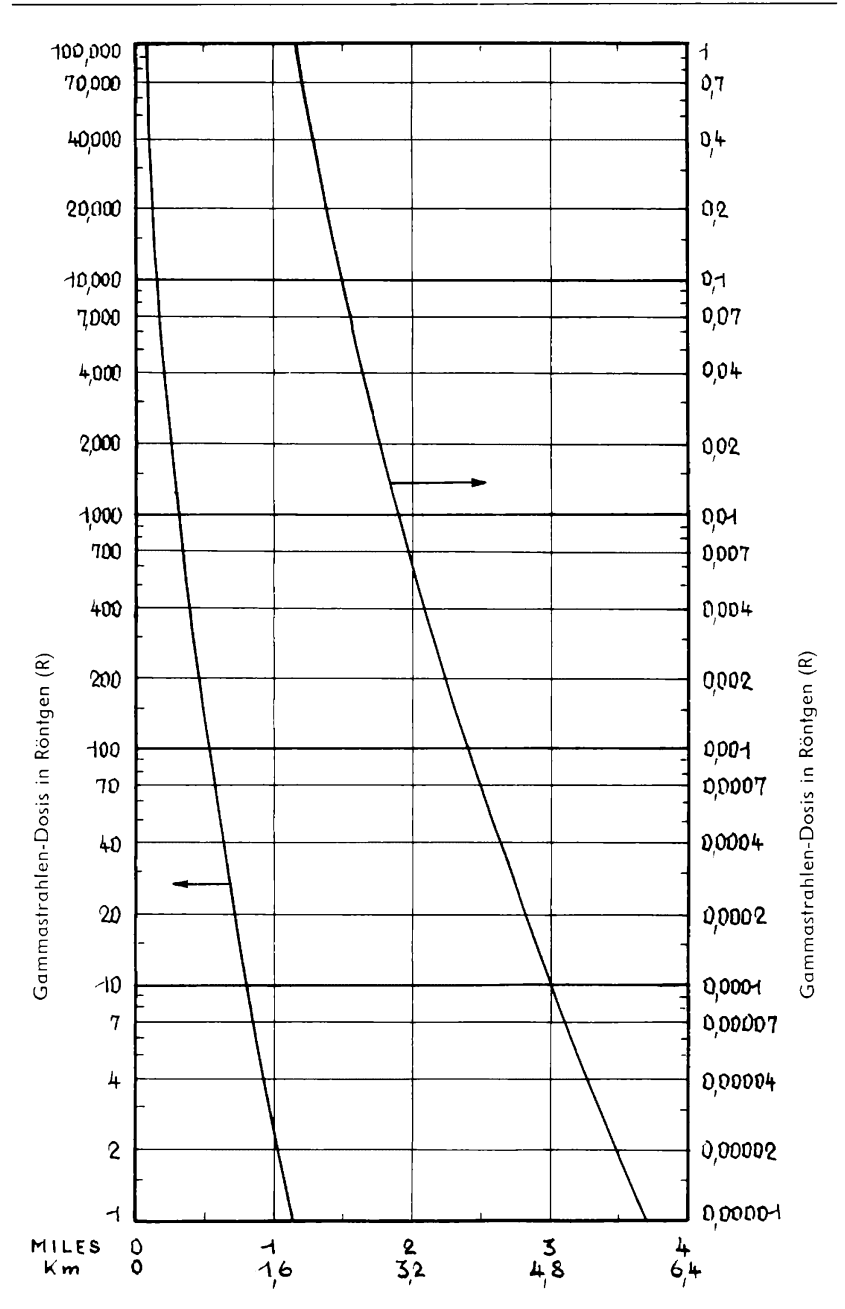


Bild 8.35a Gammastrahlendosis der Anfangsstrahlung 1-kt-Luftexplosion

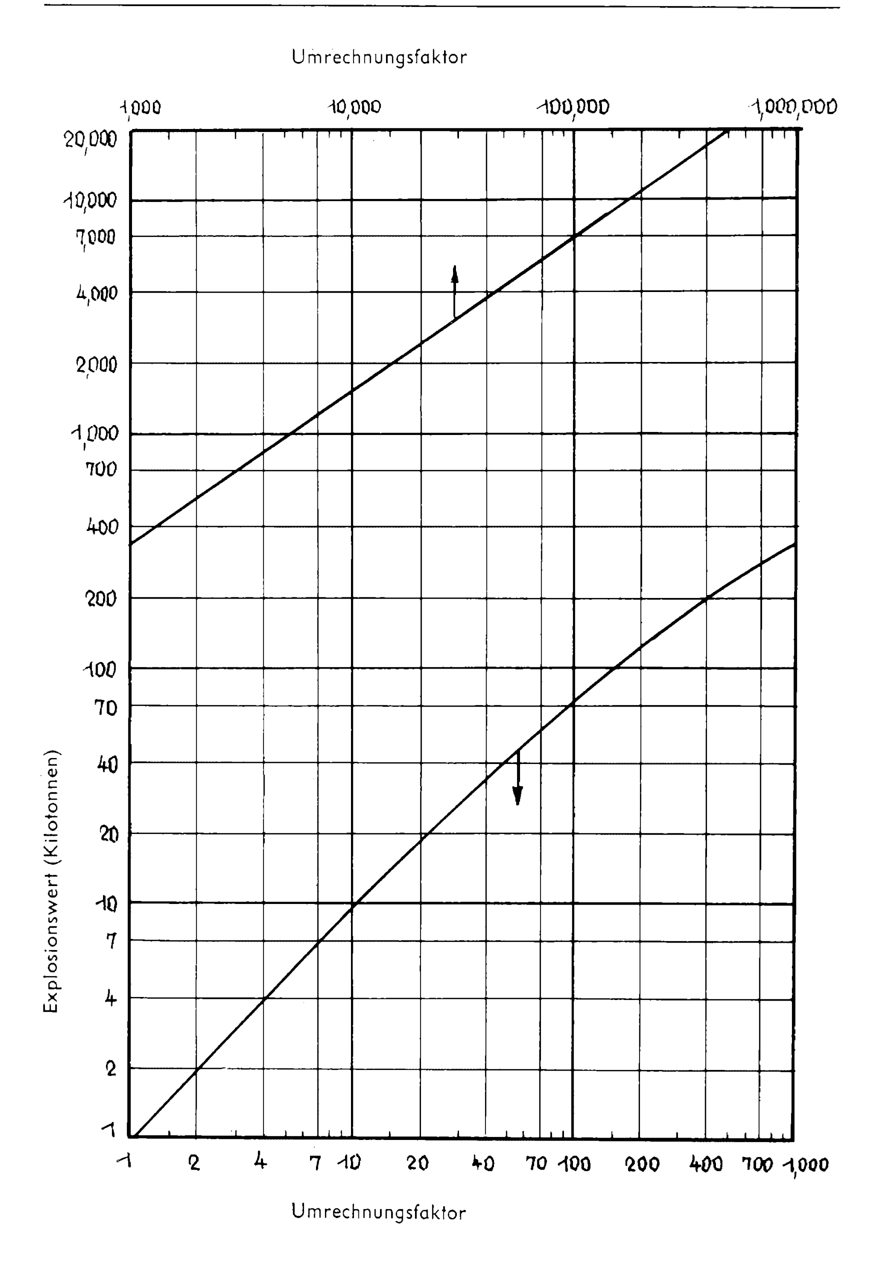


Bild 8.35 b *Umrechnungsfaktor für die Dosierung der Gammastrahlen der Anfangsstrahlung*

von zwei Faktoren ab, die etwa die gleichen sind, wie sie für die thermische Strahlung gelten: der erste Faktor ist das allgemeine Nachlassen der Strahlung auf Grund ihrer Ausbreitung über eine immer größere Fläche, wenn sie sich von dem Atomsprengkörper fortbewegt. Dadurch wird die empfangene Dosis umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung vom Explosionsort. Der zweite Faktor ist der Abschwächungsfaktor, der die Abnahme an Strahlungsintensität auf Grund von Absorption und Streuung von Gammastrahlen durch die dazwischenliegende Luft berücksichtigt.

8.35 Die Gammastrahlen-Expositionsdosen in bekannten Entfernungen von Luftexplosionen von verschiedenem Explosionswert sind in einer Anzahl von Kernexplosionsversuchen gemessen worden. Die Ergebnisse sind als übereinstimmend festgestellt worden Die Daten können in zwei graphischen Darstellungen zusammengefaßt werden: die erste (Bild 8.35 a) zeigt die Abhängigkeit der Gammastrahlendosis der Anfangsstrahlung von der Entfernung (oder Raumentfernung) von einer 1-kt-Explosion; die zweite (Bild 8.35 b) zeigt den Umrechnungsfaktor zur Ermittlung der Dosis in gleicher Raumentfernung von einer Explosion bestimmten Explosionswertes bis zu 20 Megatonnen.

8.36 Die Anwendungsmethode für die Kurven in Bild 8.35 a und 8.35 b kann veranschaulicht werden, indem hieraus die in einer Entfernung von 1,6 km von einer 100-kt-Luftexplosion empfangene Gammastrahlungsdosis der Anfangsstrahlung ermittelt wird. Nach Bild 8.35 a beträgt die Expositionsdosis in dieser Entfernung von einer 1-kt-Luftexplosion 2,5 Röntgen. Der Umrechnungsfaktor für 100 kt ist nach Bild 8.35 b = 150. Also beträgt die Gammastrahlendosis in dem betreffenden Falle 2,5 × 150 = 375 Röntgen.

8.37 Die Werte in Bild 8.35 a sind etwas abhängig von der Luftdichte zwischen dem Explosionszentrum und dem Punkt am Erdboden, an dem die Strahlung empfangen wird, und zwar deswegen, weil die Luft einen Teil der Gammastrahlung beim Durchgang absorbiert, wobei die dichte Luft nahe der Erdoberfläche mehr absorbiert als die weniger dichte Luft in größeren Höhen. Den Ergebnissen in Bild 8.35 a ist die normale Luftdichte in Meereshöhe zugrunde gelegt.

8.38 Aus Bild 8.35 b ist zu ersehen, daß im höheren Energiebereich der Umrechnungsfaktor schneller zunimmt als der Explosionswert. Zum Beispiel beträgt bei einer 100-kt-Explosion der Umrechnungsfaktor 150 und bei einer 1000-kt-(1-Megatonnen-)Explosion etwas mehr als 5000. Der Grund für diese hohe Ziffer ist die lang andauernde geringe Luftdichte nach der positiven Phase der Luftdruckwelle (Abschn. 3.5), insbesondere bei höheren Explosionswerten. Deshalb ist die Schwächung der (verzögerten) Gammastrahlen aus den Spaltungsprodukten geringer. Bei niedrigeren Explosionswerten, z. B. etwa 100 kt oder weniger, tragen sowohl die Strahlung aus den Spaltungsprodukten als auch die hochenergiehaltigen Gammastrahlen, die beim Strahlungseinfang von Neutronen durch den Stickstoff in der Luft emittiert werden, zur Erhöhung des Umrechnungsfaktors bei.

8.39 Die bei Explosionen verschiedenen Explosionswertes zu erwartenden Gammastrahlendosen können auch noch in anderer Form ausgedrückt werden, wie

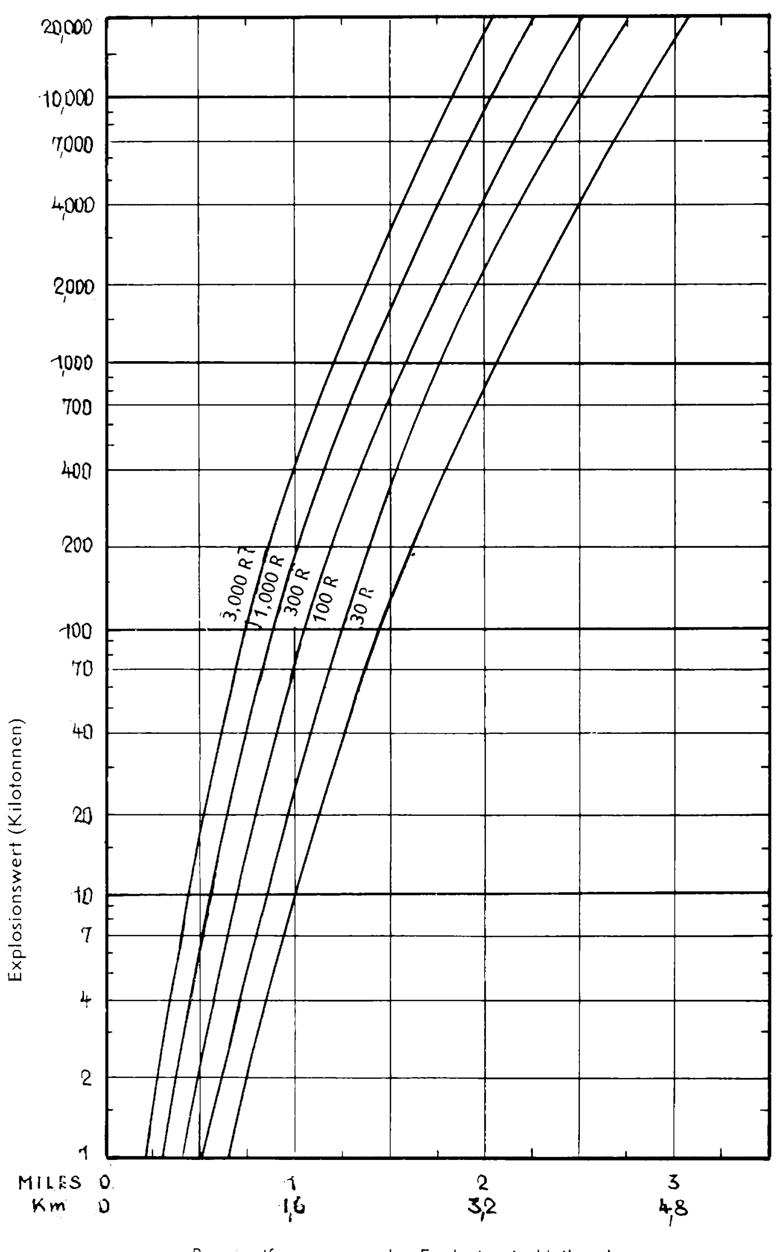


Bild 8.39 Entfernungen bei bestimmten Gammastrahlendosen der Anfangsstrahlung

aus Bild 8.39 ersichtlich. Die Raumentfernungen, d. h. die Entfernungen vom Explosionspunkt, in denen bestimmte Gammastrahlendosen der Anfangsstrahlung aus Luftexplosionen im Energiebereich von 1 kt bis 20 Megatonnen empfangen würden, können hieraus leicht abgelesen werden. Bei Zwischendosen können die entsprechenden Raumentfernungen durch Interpolation errechnet werden.

8.40 Die vorstehenden Ergebnisse gelten insbesondere für Luftexplosionen. Bei einer Bodenexplosion ist die Bestrahlungsdosis in einer bestimmten Entfernung wegen der Absorption des durch die Explosion aufgeworfenen Staubes oder Schutts etwas geringer. Jedoch ist diese Verringerung nicht sehr stark, und deshalb wird die Entfernung vom Explosionspunkt (oder die Raumentfernung), in welcher eine bestimmte Dosis, z. B. 300 Röntgen, empfangen wird, nicht nennenswert beeinflußt. Im Hinblick auf die mit einer Bodenexplosion verbundenen Ungewißheiten ist es wahrscheinlich am besten, Bild 8.35a, 8.35b und 8.39 als für diese Art der Explosion sowie für eine Luftexplosion geltend zu betrachten.

Abschirmung gegen Gammastrahlen

8.41 Die Gammastrahlen werden beim Durchdringen von Material in gewissem Umfange absorbiert (oder abgeschwächt). Als grobe Regel kann gesagt werden, daß die Verringerung der Strahlungsintensität von der Materialmasse zwischen der Strahlenquelle und dem Beobachtungspunkt abhängig ist. Das bedeutet, daß eine Substanz von geringer Dichte (z. B. Wasser) eine größere Dicke aufweisen muß, um die Strahlung um eine bestimmte Menge abzuschwächen, als eine Substanz von hoher Dichte, z. B. Eisen. Im Grunde genommen ist es nicht möglich, die Gammastrahlen vollständig zu absorbieren. Trotzdem kann die Bestrahlungsdosis auf unbedeutende Mengen abgeschwächt werden, wenn ein Material von ausreichender Dicke zwischen die Strahlungsquelle, z. B. einen explodierenden Atomsprengkörper, und den Menschen gebracht wird.

8.42 Die Wirksamkeit eines gegebenen Materials in bezug auf die Verringerung der Strahlungsintensität kann durch eine Größe dargestellt werden, die »Halbwertdicke« genannt wird. Das ist die Dicke des betreffenden Materials, die die Hälfte der einfallenden Gammastrahlung absorbiert. Wenn also ein Mensch sich an einem Punkt befindet, wo die Bestrahlungsdosis 400 Röntgen Gammastrahlung beträgt und keine Abschirmung vorhanden ist, dann würde das Dazwischenbringen einer Halbwertdicke eines Materials die Dosis auf (ungefähr) 200 Röntgen verringern. Eine weitere Halbwertdicke würde die Dosis abermals halbieren, d. h. auf (etwa) 100 Röntgen. Jede weitere Halbwertdicke verringert die Strahlungsdosis um die Hälfte, wie aus Bild 8.42 ersichtlich. Eine Halbwertdicke verringert die Strahlungsdosis auf ihren halben Wert; zwei Halbwertdicken verringern sie auf ein Viertel; drei Halbwertdicken auf ein Achtel; vier Halbwertdicken auf ein Sechzehntel usw.[1]).

[1]) Die gleiche Regel gilt für einen beliebigen anderen Bruchteil, z. B. eine Zehntelwertdicke, die die Strahlung um den Faktor 10 verringern würde; dann würden zwei Zehntelwertdicken sie um den Faktor 10^2 verringern, d. h. um 100; drei Zehntelwertdicken um den Faktor 10^3, d. h. 1000, usw.

8.43 Genau genommen sollte der Begriff der Halbwertdicke nur bei monoenergetischer Gammastrahlung angewandt werden, d. h. bei Strahlung mit nur einer Energie, in einem engen Strahlenbündel, oder wenn das Abschirm- (oder absorbierende) Material verhältnismäßig dünn ist. Keine dieser Voraussetzungen würde aber in bezug auf die Abschirmung gegen Gammastrahlen aus einer Kernexplosion anwendbar sein. Die Gammastrahlungsenergien erstrecken sich auf einen weiten Bereich, die Strahlen werden über einen großen Raum ausgestreut, und in den in Frage kommenden Gebieten sind dicke Abschirmungen erforderlich. Trotzdem kann die nach-

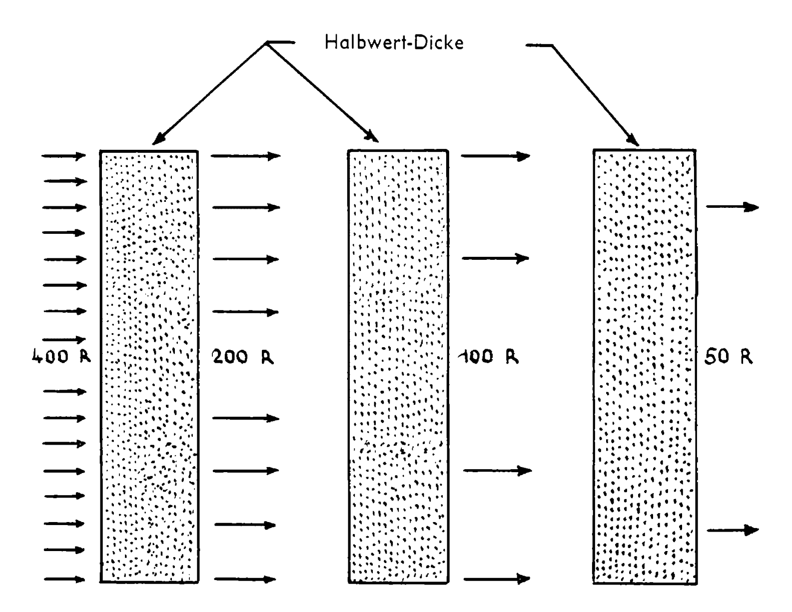


Bild 8.42 Darstellung der Halbwertdicken

stehend angegebene Halbwertdicke einem nützlichen praktischen Zweck in bezug auf die ungefähre Angabe des Schwächungsgrades der Gammastrahlen aus der Anfangsstrahlung dienen, der durch ein bestimmtes Ausmaß an Abschirmung erreicht werden kann.

8.44 Die Materialien, die wohl in erster Linie für die Abschirmung gegen die Anfangsstrahlung aus einer Kernexplosion zur Verfügung stehen, sind Stahl, Beton, Erde und Holz. Die ungefähren Halbwertdicken dieser Stoffe für Gammastrahlen sind in Tabelle 8.44 angegeben. Der Wert für Wasser ist ebenfalls mit aufgeführt, da er bei einer Luftexplosion über Wasser von Interesse sein kann. Die in der Tabelle enthaltenen Daten sind mit ziemlicher Genauigkeit für dicke Abschirmungen und für die Energie anwendbar, die bei der Anfangsstrahlung von großer Bedeutung ist.

Tabelle 8.44 Ungefähre Halbwertdicken von Materialien für die Gammastrahlen aus der Anfangsstrahlung

Material	Dichte kg/m³	Halbwertdicke cm	Produkt $\frac{kg}{m^3} \cdot cm$
Stahl	7850	3,81	29900
Beton	2300	15,24	34300
Erde	1600	19,05	30500
Wasser	1000	33,02	33000
Holz	545	58,42	31800

8.45 Aus Tabelle 8.44 ist ersichtlich, daß Stahl von 3,8 cm Dicke 15,24 cm Beton entspricht oder 19,05 cm Erde oder 58,42 cm Holz (Bild 8.45). Infolgedessen würde eine bestimmte Stahldicke eine wirksamere Abschirmung darstellen als die gleiche Dicke Beton, und diese würde wieder wirksamer sein als Erde oder Holz. Im allgemeinen ist, wie in Abschn. 8.41 ausgeführt, die zur Verringerung der Gammastrahlung auf einen bestimmten Bruchteil ihrer ursprünglichen Intensität erforderliche Dicke um so geringer, je größer die Dichte des Materials ist. Wie aus den Ergebnissen in der letzten Spalte von Tabelle 8.44 hervorgeht, ist das Produkt der Dichte mal Halbwertdicke ungefähr bei den 5 Materialien gleich. Infolgedessen kann, wenn die Halbwertdicke einer Substanz unbekannt, die Dichte aber bekannt ist, eine ziemlich genaue Berechnung durchgeführt werden, indem man annimmt, daß das Produkt der Halbwertdicke in cm mal der Dichte in kg/m³ etwa 32000 ist.

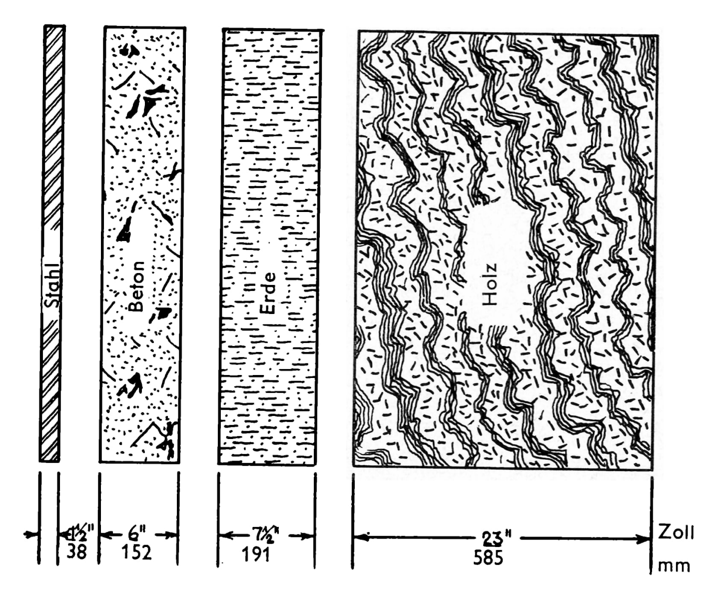


Bild 8.45 Vergleich der Halbwertdicken

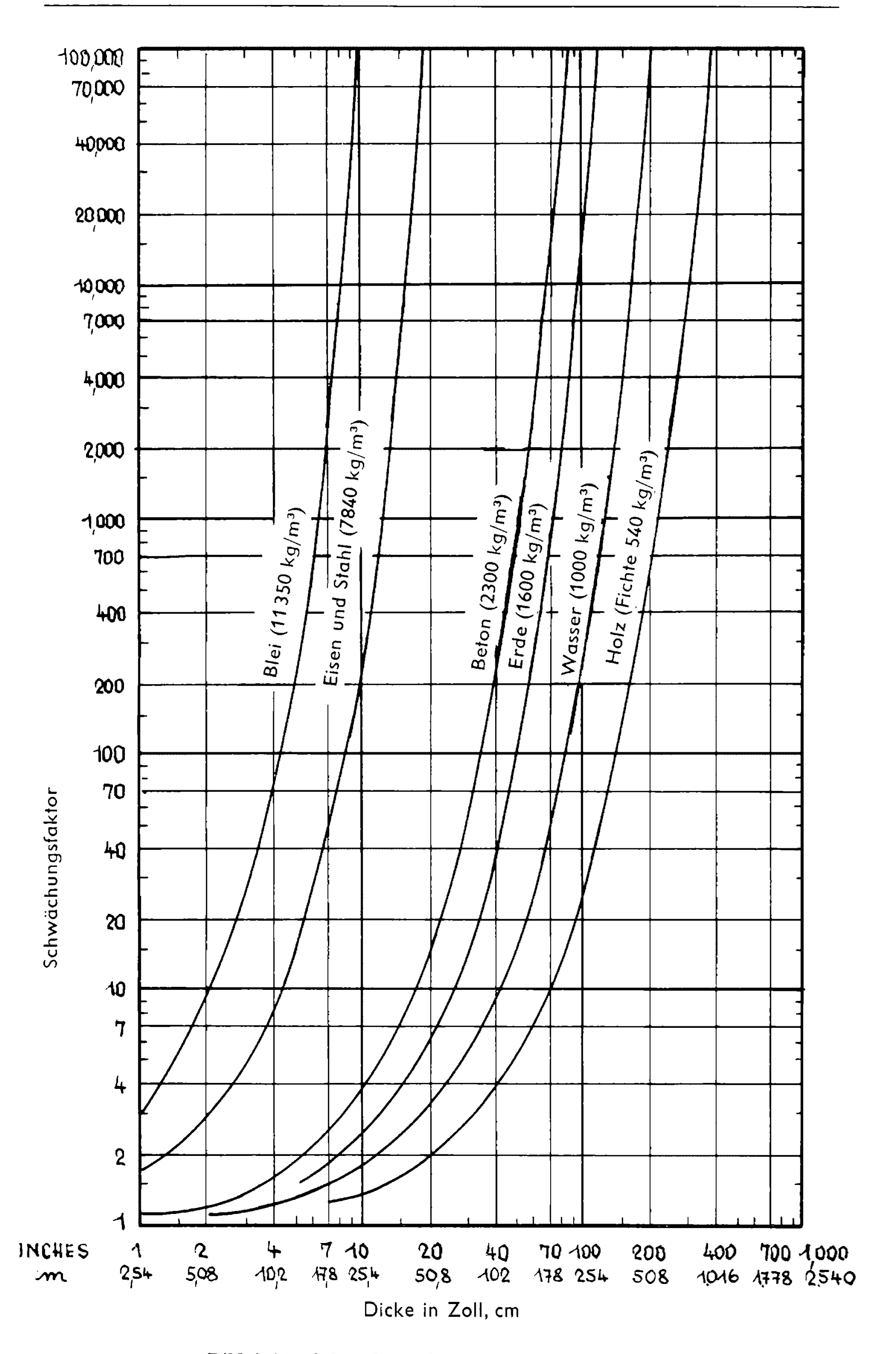


Bild 8.47 Schwächung der Anfangsgammastrahlung

8.46 Der Schwächungsfaktor einer gegebenen Abschirmung, d. h. das Verhältnis der Strahlungsdosis, die auf die Abschirmung fällt, zu der Strahlungsdosis, die hinter der Abschirmung empfangen würde, kann aus der Zahl der Halbwertdicken zusammen mit den Daten aus Tabelle 8.44 leicht errechnet werden. Zum Beispiel enthält eine Erdabschirmung von 76 cm Dicke $76 : 19 = 4{,}0$ Halbwertdicken. Der Schwächungsfaktor ist dann 2^4, d. h. 16, so daß die Gammastrahlendosis auf rund $^1/_{16}$ der Dosis reduziert wird, die ohne die Abschirmung empfangen worden wäre. Somit würde in dem in Abschn. 8.36 erwähnten Falle die Strahlungsdosis auf 375/16, d. h. 23,4 Röntgen verringert werden.

8.47 Die Berechnungen können durch Anwendung des Bildes 8.47 vereinfacht werden, in welcher die Schwächungsfaktoren für verschiedene Dicken an Eisen, Beton, Erde und Holz graphisch dargestellt sind. Nehmen wir an, daß an einem bestimmten Punkt die Gammastrahlen-Expositionsdosis ohne Abschirmung, d. h. wie in Bild 8.35a und b angegeben, 500 Röntgen betragen würde. Welche Betondicke würde erforderlich sein, die Dosis auf 10 Röntgen zu verringern? Der erforderliche Schwächungsfaktor ist $500/10 = 50$, und wir sehen aus Bild 8.47, daß man dies mit 74 cm Beton erreichen könnte.

8.48 In einem luftleeren Raum wandern die Gammastrahlen in gerader Linie mit Lichtgeschwindigkeit. Jedoch wird die Gammastrahlung ebenso wie die thermische Strahlung bei ihrem Wandern durch die Atmosphäre gestreut, vor allem durch den in der Luft enthaltenen Sauerstoff und Stickstoff. Dadurch erreichen die Gammastrahlen ein bestimmtes Ziel am Erdboden aus allen Richtungen. Der größte Teil der empfangenen Dosis kommt aus der Richtung der Explosion, aber eine beträchtliche Menge Streustrahlung kommt noch aus anderen Richtungen. Diese Tatsache ist für das Problem der Abschirmung gegen Kernstrahlen von großer Bedeutung.

8.49 Ein Mensch, der hinter einer einzelnen Wand, einer Böschung oder einem Hügel in Deckung geht. wird (teilweise) vor den direkten Gammastrahlen geschützt

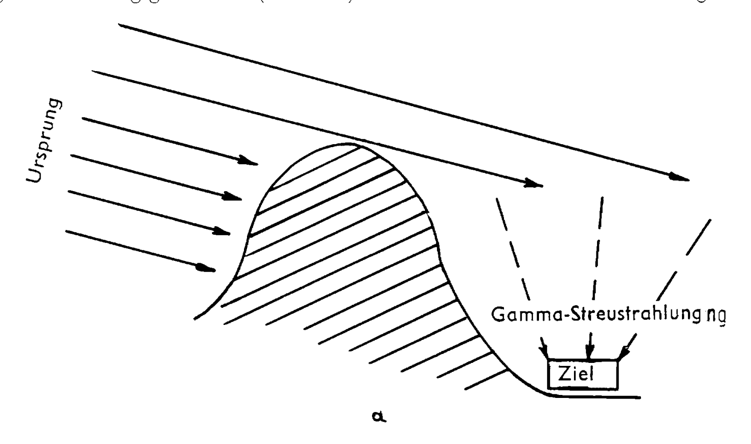


Bild 8.49a Ziel, das der Gammastreustrahlung ausgesetzt ist.

sein, aber er wird immer noch der Streustrahlung ausgesetzt sein, wie aus den unterbrochenen Linien in Bild 8.49a ersichtlich ist. Ein ausreichender Schutz gegen Gammastrahlen ist nur dann gewährleistet, wenn die Abschirmung derart ist, daß sie den Menschen völlig umgibt, so daß er aus allen Richtungen abgeschirmt ist (Bild 8.49b). In diesem Fall kann sowohl die direkte als auch die Streustrahlung abgeschwächt werden. Da jedoch die Intensität der Streustrahlung geringer ist als die

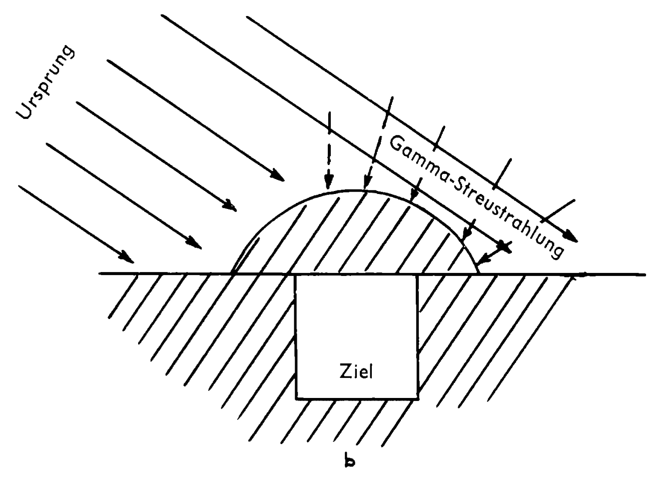


Bild 8.49b Gegen Gammastreustrahlung abgeschirmtes Ziel

der einfallenden Strahlung, braucht die Abschirmung in anderen Richtungen als der (zu erwartenden) Explosionsrichtung nicht so stark zu sein, um den gleichen Schutzgrad zu erreichen.

Geschwindigkeit der Abgabe der Anfangsgammastrahlen

8.50 Bei den auf Bild 8.35a basierenden Berechnungen der Strahlungsdosis ist vorausgesetzt, daß die Bestrahlung eine ganze Minute andauert; dieser Zeitraum wurde etwas willkürlich als Emissionsdauer der Anfangsstrahlung angesetzt. Man muß aber einiges über die Geschwindigkeit wissen, mit welcher die Strahlung von dem explodierenden Atomsprengkörper abgegeben wird. Wenn man das weiß, kann man eine ungefähre Vorstellung von der Dosis erhalten, die man empfangen würde, wenn man einem Teil der Strahlung entgehen könnte, z. B., indem man innerhalb von 1 oder 2 Sekunden nach dem Auftreten des Lichtblitzes aus der Explosion in Deckung geht.

8.51 Die Abgabegeschwindigkeit der Anfangsgammastrahlen hängt von einer Anzahl von Umständen ab, von denen die bedeutsamsten der Explosionswert sowie die Entfernung vom Explosionspunkt sind. Der Prozentsatz der bis zu verschiedenen Zeiten empfangenen Gesamtdosis ist in Bild 8.51 für zwei verschiedene Fälle dar-

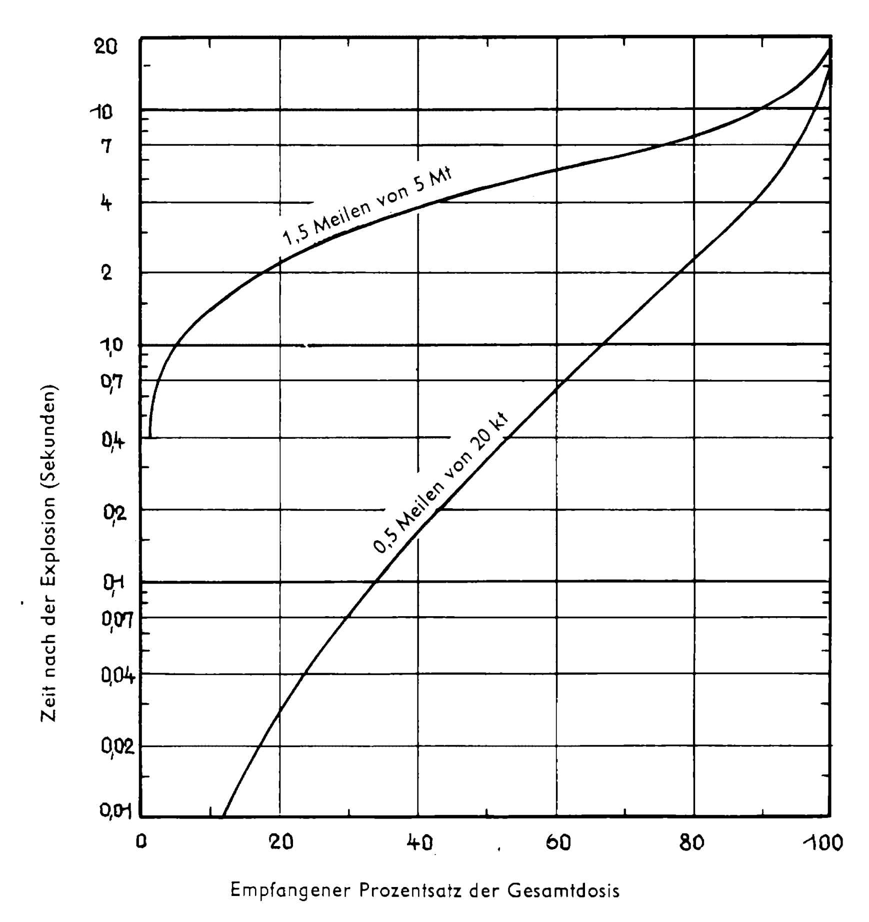


Bild 8.51 Prozentsatz der gesamten Anfangsgammastrahlendosis, der zu verschiedenen Zeiten nach der Explosion empfangen wird.

gestellt. Die eine Kurve stellt die Abgabegeschwindigkeit in einer Entfernung von 800 m von der Luftexplosion eines 20-kt-Sprengkörpers dar, die andere Kurve gilt für eine Entfernung von 2,4 km von einer 5-Megatonnen-Explosion. Wir sehen, daß im ersteren Falle etwa 65% und im letzteren etwa 4% der gesamten Anfangsgammastrahlendosis in der ersten Sekunde nach der Explosion empfangen wird.

8.52 Es scheint also, daß, wenn einige Abschirmung erreicht werden könnte, z. B. indem man sich, wie in Abschn. 7.54 empfohlen, innerhalb einer Sekunde nach Bemerken des Lichtblitzes bäuchlings, vorzugsweise hinter einem größeren Objekt, zur Erde wirft, dies unter Umständen Leben oder Tod bedeuten kann.

Die Kurven in Bild 8.51 zeigen, daß bei einem Atomsprengkörper von hohem Explosionswert die Gammastrahlung, insbesondere in den ersten Stadien unmittelbar

nach der Explosion, langsamer emittiert wird als bei einem Atomsprengkörper von geringerem Explosionswert. Bei höheren Explosionswerten würde es leichter sein, einem Teil der Anfangs-Gammastrahlendosis zu entgehen.

Neutronen

Neutronenquellen

8.53 Obwohl die Neutronen nukleare Teilchen von beträchtlicher Masse sind, während die Gammastrahlen elektromagnetische Wellen ähnlich den Röntgenstrahlen sind, ist ihre schädliche Wirkung auf den menschlichen Körper doch ähnlicher Art. Ebenso wie die Gammastrahlen können nur sehr große Neutronendosen von den menschlichen Sinnesorganen wahrgenommen werden. Die Neutronen können auf bedeutende Entfernungen die Luft durchdringen und stellen eine größere Gefahr dar, als man nach dem kleinen Bruchteil (etwa 0,025%) der Explosionsenergie, die sie übertragen, erwarten sollte.

8.54 Im wesentlichen werden alle bei einer Kernexplosion auftretenden Neutronen entweder in dem Spaltungs- oder in dem Verschmelzungsprozeß ausgelöst (Abschn. 1.33, 1.57). Alle Neutronen aus der letzteren Quelle und über 99% der Spaltungsneutronen werden fast augenblicklich erzeugt, wahrscheinlich innerhalb von weniger als einer Millionstelsekunde nach Auslösung der Explosion. Diese werden die »prompten« Neutronen genannt.

8.55 Außerdem werden anschließend etwas weniger als 1% der Spaltungsneutronen, die sog. »verzögerten« Neutronen, emittiert. Da jedoch die Mehrzahl dieser verzögerten Neutronen innerhalb der ersten Minute emittiert wird, bilden sie einen Teil der Anfangsstrahlung. Einige Neutronen werden auch durch die Einwirkung der Gammastrahlen hoher Energie auf das Sprengkörpermaterial erzeugt. Diese stellen aber nur einen sehr geringen Prozentsatz dar und können also unbeachtet bleiben.

8.56 Obwohl alle prompten Neutronen, wie oben gesagt, innerhalb von weniger als einer Millionstelsekunde nach der Explosion freiwerden, werden sie beim Entweichen aus der Umgebung des explodierenden Atomsprengkörpers etwas verzögert. Diese Verzögerung ergibt sich aus den zahlreichen streuenden Zusammenstößen mit den in den Sprengkörperresten vorhandenen Kernen. Dadurch legen die Neutronen einen komplizierten Zickzackweg zurück, bevor sie schließlich austreten. Sie haben eine ziemlich hohe Geschwindigkeit, aber der tatsächlich (durchschnittliche) Weg, den sie zurücklegen, ist verhältnismäßig lang, und so vergeht einige Zeit, bevor sie die Außenseite des Feuerballes erreichen. Die Verzögerung des Austretens der prompten Neutronen beträgt jedoch nicht mehr als etwa eine Hundertstelsekunde.

8.57 Die Neutronen wandern zwar mit einer Geschwindigkeit, die geringer ist als

die des Lichts. Trotzdem werden sie in Entfernungen von der Explosion, in denen sie eine Gefahr darstellen, nahezu sämtlich innerhalb einer Sekunde nach der Explosion empfangen. Die in Abschn. 8.52 beschriebene Abwehrbewegung hat also auf die empfangene Neutronendosis nur geringen Einfluß.

Energieverteilung der Neutronen

8.58 Die bei dem Spaltungsprozeß erzeugten Neutronen haben einen Energiebereich, aber praktisch liegen sie alle im Bereich hoher Energie. Solche Neutronen von hoher Energie werden »schnelle Neutronen« genannt, ihre Energie ist kinetischer Art. Bei den streuenden Zusammenstößen zwischen den schnellen Neutronen und den Atomkernen findet ein Austausch an kinetischer Energie zwischen den Neutronen und den Kernen statt. Dadurch verlieren die Neutronen einen Teil ihrer Energie und werden infolgedessen verlangsamt. Die den explodierenden Atomsprengkörper verlassenden Neutronen haben also Geschwindigkeiten (oder Energien), die sich über einen großen Bereich erstrecken, von schnell über mittelmäßig bis langsam. Die Neutronen mit der geringsten Geschwindigkeit werden oft »thermische Neutronen« genannt, weil sie sich im thermischen Gleichgewicht (oder Temperaturgleichgewicht) mit ihrer Umgebung befinden.

8.59 Nachdem die Neutronen die Umgebung des Atomsprengkörpers verlassen haben, stoßen sie mit den Kernen des in der Luft vorhandenen Stickstoffs, Sauerstoffs und anderer Elemente zusammen. Diese Zusammenstöße sind wegen des geringeren Druckes und der geringeren Konzentration von Kernen in der Luft weniger häufig als in dem Atomsprengkörper. Trotzdem sind die Auswirkungen der Zusammenstöße von Bedeutung. Erstens ist die Verringerung der Neutronenenergie je Zusammenstoß im Durchschnitt bei leichten Kernen am größten. Die Sauerstoff- und Stickstoffkerne sind verhältnismäßig leicht, so daß die Neutronen durch die streuenden Zusammenstöße in der Luft beträchtlich verlangsamt werden.

8.60 Außerdem können die Neutronen bei manchen Zusammenstößen, insbesondere bei Zusammenstößen mit Stickstoffkernen, eingefangen werden (s. Abschn. 8.9), so daß sie vollständig beseitigt sind. Die Einfangwahrscheinlichkeit ist bei den langsamen Neutronen am größten. Es treten also viele Einwirkungen auf die Neutronen bei ihrem Wandern durch die Luft von dem Atomsprengkörper bis zu einem Punkt am Erdboden auf. Die schnellen Neutronen (von hoher Energie) verlieren einen Teil ihrer Energie und werden verlangsamt. Gleichzeitig werden die langsameren Neutronen leichter eingefangen und somit aus der Kernstrahlung ferngehalten, obwohl das Einfangen meist zur Emission von Gammastrahlen führt.

8.61 Bei der Messung von Neutronen aus Atomsprengkörpern und dem Studium ihrer biologischen Wirkungen ist es wichtig, etwas darüber zu wissen, wie die Verteilung von Neutronenenergien (oder des »Neutronenspektrums«) sich mit der Entfernung von der Explosion ändert. Aus einer Reihe von Messungen bei den Kernexplosionsversuchen in Nevada im Jahre 1955 scheint es, daß – zumindest bei den

erprobten Meßgeräten – das Energiespektrum bei einem bestimmten Gerät in den Entfernungsbereichen, die biologisch von Interesse sind, gleichbleibt. Dieser Zustand wird »Gleichgewichtsspektrum« genannt.

8.62 Die wahrscheinliche Erklärung für dieses bedeutsame Ergebnis liegt darin, daß auf Grund einer Verkettung von Umständen der Verlust der langsameren Neutronen, die z. B. durch Stickstoffkerne eingefangen werden, durch das Verlangsamen der schnellen Neutronen genau ausgeglichen wird. Die Gesamtzahl der je Flächeneinheit an einem gegebenen Punkt empfangenen Neutronen ist um so geringer, je weiter dieser Punkt von der Explosion entfernt ist, da einige der schnellen Neutronen, außer ihrer Ausbreitung über einen großen Raum (Abschn. 8.34), verlangsamt werden und die langsameren Neutronen durch Einfangen beseitigt werden. Aber der Prozentsatz (oder Bruchteil) der Neutronen in einem bestimmten Energiebereich scheint bei allen Entfernungen, die von Interesse sind, im wesentlichen gleich zu sein.

Messung der Neutronen

8.63 Die Neutronen erzeugen, da sie elektrisch neutrale Teilchen sind, unmittelbar bei ihrem Durchdringen von Materie keine Ionisierung oder Anregung. Sie können jedoch durch ihre Einwirkung auf gewisse leichte Kerne indirekt eine Ionisierung verursachen. Wenn ein schnelles Neutron z. B. mit einem Wasserstoffkern zusammenstößt, dann kann das Neutron einen großen Teil seiner Energie auf diesen Kern übertragen. Dadurch wird der Wasserstoffkern von seinem zugehörigen Elektron befreit und bewegt sich als Proton von hoher Energie weiter (Abschn. 8.16). Ein solches Proton kann bei seinem Wandern durch ein Gas eine beträchtliche Menge Ionenpaare erzeugen. Somit kann die Einwirkung eines schnellen Neutrons auf Wasserstoff (oder auf irgendeine andere Wasserstoff enthaltende Substanz) eine indirekte Ionisierung verursachen. In ähnlicher Weise entsteht eine indirekte Ionisierung – wenn auch in geringerem Umfange – bei Zusammenstößen schneller Neutronen mit anderen leichten Kernen, z. B. Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff[1]).

8.64 Die Neutronen im langsamen und mittleren Geschwindigkeitsbereich können indirekt auf andere Weise eine Ionisierung verursachen. Wenn diese Neutronen durch die leichteren Borisotope (Borium-10) eingefangen werden, bilden sich zwei elektrisch geladene Teilchen von hoher Energie – ein Heliumkern (Alphateilchen) und ein Lithiumkern. Beide Teilchen können Ionenpaare erzeugen. Eine indirekte Ionisierung durch Neutronen kann auch aus der Spaltung von Plutonium- oder Uranisotopen entstehen. Die Spaltungsfragmente sind elektrisch geladene Teilchen (Kerne) von hoher Energie, die auf ihrem Wege eine beträchtliche Ionisierung zurücklassen.

8.65 Sämtliche vorstehenden indirekten Ionisierungsprozesse können zum Nachweisen und Messen der Neutronenintensität verwendet werden. Die hierfür benutzten

[1]) Die durch die Einwirkung schneller Neutronen auf Wasserstoff und Stickstoff im Zellgewebe erzeugte Ionisierung ist die Hauptursache biologischer Schäden durch Neutronen.

Geräte, z. B. Boriumzähler und Spaltkammern, sind im großen ganzen den meist für Gammastrahlungen verwendeten Geigerzählern ähnlich. Es sind »gewebeäquivalente« Kammern entwickelt worden, in denen die indirekt durch Neutronen erzeugte Ionisierung zu der Energie in Beziehung gesetzt wird, die aus diesen Neutronen von tierischem Zellgewebe aufgenommen würde.

8.66 Außer den vorstehend beschriebenen Methoden sind »Folien-Aktivierungs«-Methoden weitgehend für den Nachweis und die Messung von Neutronen in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen angewandt worden. Es werden bestimmte Elemente durch das Einfangen von Neutronen in radioaktive Isotope umgewandelt (Abschnitt 8.8). Die Menge induzierter Radioaktivität, die aus der durch die emittierten Betateilchen oder Gammastrahlen erzeugten Ionisierung ermittelt wird, ist die Grundlage der »Aktivierungs«-Verfahren. Der Detektor wird im allgemeinen in Form eines dünnen Blättchens (oder einer Folie) verwendet, so daß seine Wirkung auf das Neutronenfeld nicht von Bedeutung ist.

8.67 Die »Spaltfolien«-Methode macht, wie ihr Name sagt, die Spaltungsreaktionen nutzbar. Eine dünne Schicht eines spaltbaren Materials, z. B. eines Uranium- oder Plutoniumisotops, wird Neutronen ausgesetzt. Die entstehenden Spaltungsprodukte sind hochradioaktiv und emittieren Betateilchen und Gammastrahlen. Durch Messen der auf diese Weise erzeugten Radioaktivität kann die Spaltungsmenge und damit der Neutronenfluß ermittelt werden.

8.68 Die Neutronendosis in rad, die an einem bestimmten Punkt absorbiert wird, kann ermittelt werden, indem man gewisse Berechnungen auf die Messungen der Folienaktivierung anwendet. Die auf Ionisierungsmessungen beruhenden Instrumente sind meist durch Folien-Aktivierungsmeßwerte geeicht, und so können sie auch dazu verwendet werden, die Neutronendosis von bestimmter Energie (oder bestimmter Energiebereiche) in rad anzuzeigen. Wir sehen also, daß es Methoden zur Feststellung der Neutronen-Absorptionsdosen in rad gibt.

8.69 Um die biologische Dosis in rem zu ermitteln, nachdem die absorbierte Dosis in rad gemessen worden ist, muß man den relativen biologischen Effekt (RBE) kennen. Der Wert dieser Größe bei Neutronen in Verbindung mit einer Kernexplosion war lange Zeit ungewiß. Aus Beobachtungen an Mäusen geht hervor, daß der RBE von Atomsprengkörperneutronen in Entfernungen, in denen Verluste durch Neutronenabsorption zu erwarten sind, etwa 1,7 beträgt. Die Anwendbarkeit eines ähnlichen Wertes auf Menschen hat ihre Bestätigung in einer Analyse der Strahlungsverletzungen und des Strahlungstodes nach den Kernexplosionen in Japan gefunden[1]).

[1]) Die Ziffer 1,7 für den RBE von Atomsprengkörperneutronen mag vielleicht zu hoch angesetzt sein; es ist dies aber zur Zeit wahrscheinlich der beste anwendbare Wert. Die RBE-Werte von 10 für schnelle Neutronen und 3–4 für langsame (thermische) Neutronen sind in der Literatur zu finden, aber sie gelten insbesondere für (nicht die Sehkraft behindernde) Graue-Star-Bildung.

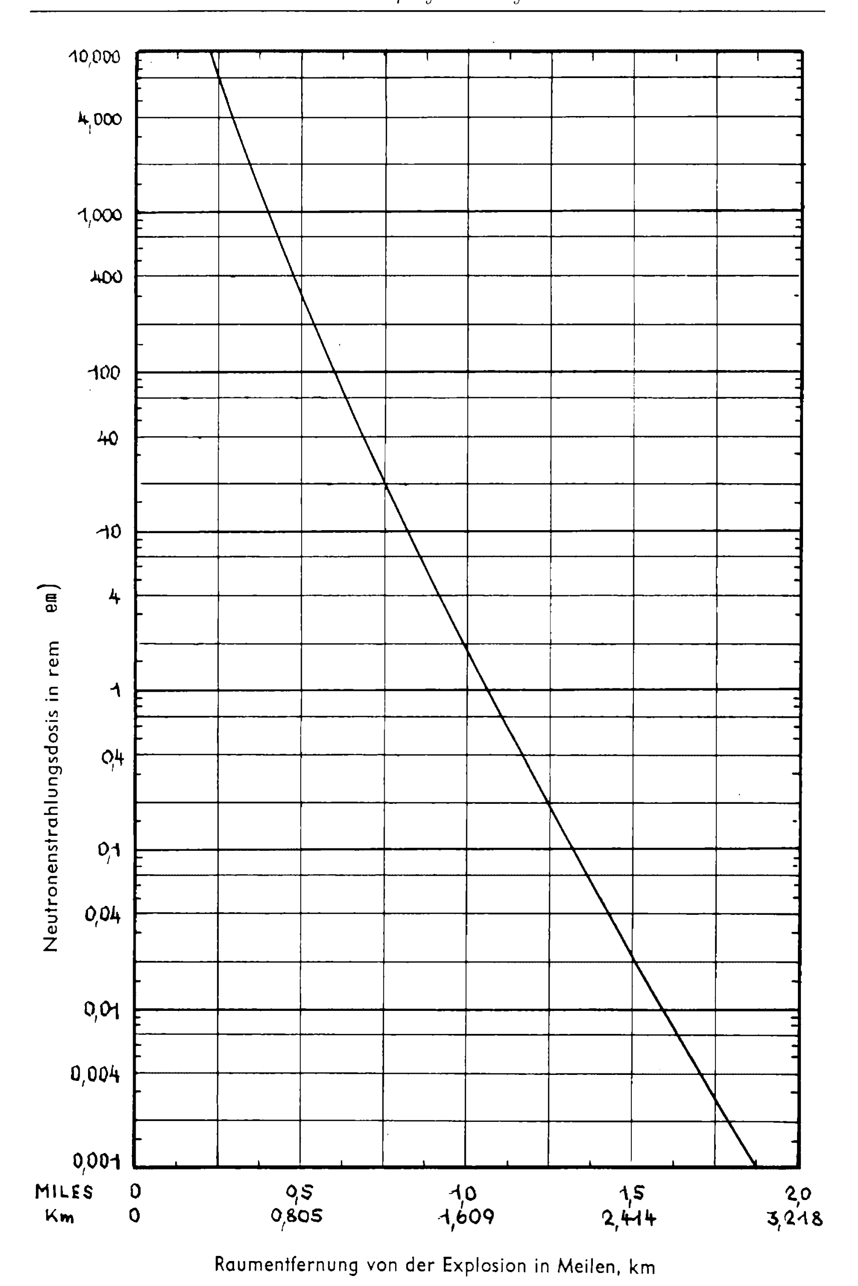


Bild 8.71 Biologische Neutronendosis bei einer Luftexplosion von 1 kt

Beziehung zwischen Neutronendosis und Entfernung

8.70 Während die Stärke der Anfangs-Gammastrahlungsdosis aus einer Kernexplosion auf einfache Weise in Übereinstimmung mit den bei einer Anzahl von Versuchen gemachten Beobachtungen ausgedrückt werden kann (Abschn. 8.35), ist dies in bezug auf die Neutronendosis nicht der Fall. Diese scheint sich stark mit den Veränderungen der Merkmale der Kernwaffe zu ändern. Die Sprengkörpermaterialien z. B. haben einen starken Einfluß auf das Ausmaß des Neutroneneinfangs und damit auch auf die Anzahl und Energieverteilung der Spaltungsneutronen, denen es gelingt, in die Luft zu entweichen. Ferner werden, wie in Abschn. 1.15 ausgeführt, bei der thermonuklearen Reaktion zwischen Deuterium und Tritium Neutronen von hoher Energie freigemacht. Es ist deshalb anzunehmen, daß bei einer Explosion, bei der ein Teil der Energie aus thermonuklearen (Verschmelzungs-)Prozessen herrührt, ein größerer Prozentsatz hochenergetischer (schneller) Neutronen auftreten wird als aus einem reinen Spaltungssystem.

8.71 Hieraus geht klar hervor, daß sowohl die Anzahl der Neutronen je Kilotonne Energie als auch ihr Energiespektrum bei den einzelnen Kernwaffen verschieden sein kann. Darum kann eine einzige Kurve für die Neutronendosis in Abhängigkeit von der Entfernung, so wie sie für die Anfangs-Gammastrahlungsdosis in Bild 8.35a enthalten ist und aus der die Ergebnisse für eine Waffe von beliebigem Explosionswert errechnet werden können, nur einen Kompromiß darstellen. Mit dieser Einschränkung ist die Kurve in Bild 8.71 für die Neutronendosis bei einer Luftexplosion von 1 kt dargestellt. Die Dosis ist in rem angegeben, so daß sie ein Maßstab für die biologische Wirkung ist. Um die in bestimmter Entfernung von einer Explosion von W kt empfangene Dosis zu ermitteln, wird der für diese Entfernung aus Bild 8.71 erhaltene Wert mit W multipliziert. Dieses Umrechnungsverfahren ist keineswegs genau, aber es ist wahrscheinlich ausreichend. Wie bei anderen Strahlungsarten wird die Dosis in größeren Entfernungen vom Explosionszentrum geringer, zum Teil weil die Neutronen über eine größere Fläche verteilt werden (quadratisches Abstandsgesetz), und zum Teil wegen der Absorption und Streuung.

8.72 Die Werte in Bild 8.71 können auch in anderer Weise dargestellt werden, wie aus Bild 8.71 ersichtlich. Hier sind die Entfernungen vom Explosionszentrum (oder Raumentfernungen) aufgezeigt, in denen verschiedene (biologische) Neutronendosen aus Luftexplosionen von 1 kt bis 20 Megatonnen empfangen würden. Verwendet man entweder Bild 8.71 und das einfache proportionale Umrechnungsgesetz oder Bild 8.72 mit Interpolation zwischen den Kurven, dann stellt man fest, daß in einer Entfernung von 1,6 km vom Explosionszentrum die aus einer Luftexplosion von 100 kt empfangene Neutronendosis etwa 200 rem betragen würde.

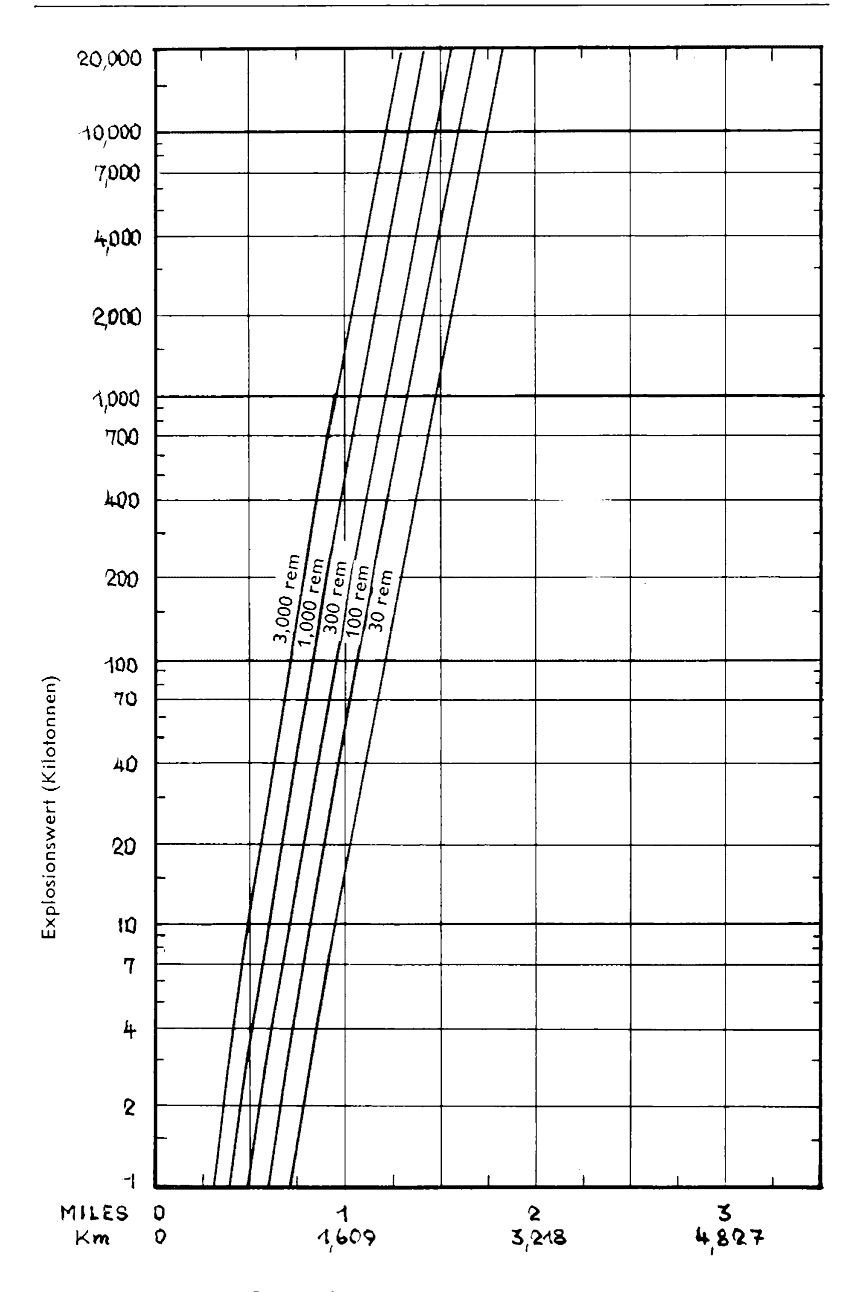


Bild 8.72 Bereiche bestimmter biologischer Neutronendosen

Abschirmung gegen Neutronen

8.73 Die Abschirmung gegen Neutronen ist ein anderes und schwierigeres Problem als die Abschirmung gegen Gammastrahlen. In letzterem Falle handelt es sich nur darum, eine genügende Materialmasse zwischen die Gammastrahlungsquelle und das Objekt zu bringen. Schwere Metalle, wie Eisen und Blei, sind wegen ihrer großen Dichte gute Abschirmungen gegen Gammastrahlen. Für eine Abschirmung gegen Neutronen sind diese Elemente jedoch nicht so ausreichend. Eine Eisenabschirmung schwächt die Neutronen in gewissem Ausmaße ab, sie ist aber nicht so wirksam wie eine Abschirmung der weiter unten beschriebenen Art.

8.74 Die Abschwächung der Neutronen aus einer Kernexplosion ist mit mehreren verschiedenen Vorgängen verbunden. Zunächst müssen die sehr schnellen Neutronen auf mittlere Geschwindigkeit verlangsamt werden; das erfordert ein geeignetes (nichtelastisches) Streumaterial, z. B. ein Barium oder Eisen enthaltendes. Dann müssen die mittelschnellen Neutronen mittels eines Elementes von geringem Atomgewicht in langsame Neutronen umgewandelt werden. Wasser ist hierfür gut geeignet, da seine beiden Grundelemente, Wasserstoff und Sauerstoff, ein niedriges Atomgewicht haben. Die langsamen (thermischen) Neutronen müssen dann absorbiert werden. Das ist nicht schwierig, da der Wasserstoff in dem Wasser diesem Zweck dienen kann. Leider werden jedoch bei den meisten Neutronen-Einfangreaktionen Gammastrahlen emittiert (Abschn. 8.8). Deshalb muß ein Material hinzugefügt werden, das die Gammastrahlen ausreichend abschwächt, damit die durch das Einfangen entstehenden Gammastrahlen nur in einem Mindestmaß die Abschirmung durchdringen können.

8.75 Im allgemeinen stellt Beton oder feuchte Erde einen guten Kompromiß für die Abschirmung gegen Neutronen und Gammastrahlen dar. Obwohl diese Materialien normalerweise keine Elemente von hohem Atomgewicht aufweisen, enthalten sie doch einen ziemlich hohen Prozentsatz Wasserstoff, um die Neutronen zu verlangsamen und einzufangen; ferner enthalten sie Kalzium, Silizium und Sauerstoff, um die Gammastrahlen zu absorbieren. Beton von 25 cm Dicke verringert z. B. die Neutronendosis um einen Faktor 10, und 50 cm verringern sie um einen Faktor von ungefähr 100. Die Anfangsgammastrahlung würde etwas weniger stark verringert werden; aber Beton, in ausreichender Dicke verwendet, könnte eine Abschirmung sowohl gegen Neutronen als auch gegen Gammastrahlen aus einer Kernexplosion darstellen. Feuchte Erde wirkt wahrscheinlich ebenso.

8.76 Eine verstärkte Absorption der Kernstrahlen kann durch Verwendung eines veränderten (»schweren«) Betons erreicht werden, den man erhält, wenn man der Mischung einen größeren Prozentsatz Eisen-(Oxyd-)Erz, z. B. Limonit (Brauneisenerz) hinzufügt und kleine Eisenstücke mit untermischt, z. B. Stahlstanzstücke. Ein schweres Element im Beton erhöht die Abschirmkraft einer gegebenen Materialdicke (oder eines Materialvolumens). Die Abschwächung der Neutronendosis um einen Faktor 10 erfordert etwa 18 cm von diesem schweren Beton.

8.77 Das Vorhandensein von Bor oder Borgemisch in dem Neutronenabschirmmaterial hat gewisse Vorteile. Das leichtere (Borium-10-)Isotop des Elements fängt die langsamen Neutronen sehr rasch ein (Abschn. 8.46); hierbei werden Gammastrahlen von mittlerer Energie (0,48 MeV) emittiert, die unschwer abzuschwächen sind. Deshalb kann das mineralische Colemanit (Kalziumborat), welches einen hohen Prozentsatz Bor enthält, in Beton untergemischt werden, um seine Neutronenabsorptionsfähigkeit zu steigern.

8.78 In Abschn. 8.49 ist ausgeführt, daß wegen der Streuung der Gammastrahlen ein ausreichender Schutz nach allen Richtungen geschaffen werden muß. Etwa das gleiche gilt für die Neutronen. Wie bereits dargelegt, werden die Neutronen in der Luft stark gestreut, so daß die Richtung ihrer Bewegung selbst in mäßigen Entfernungen von der Explosion ziemlich ungleichmäßig ist, bis sie zur Erde gelangen. Bei sehr großen Entfernungen jedoch haben viele der gestreuten Neutronen eine verhältnismäßig geringe Energie und tragen nicht sehr stark zur biologischen Gesamtdosis bei. Ein Teilschutz gegen Schäden durch Neutronen kann dann durch ein Objekt oder ein Bauwerk erreicht werden, das nur eine Abschirmung in Richtung der Explosion darstellt, obwohl bei Gammastrahlen ein besserer Schutz durch eine Abschirmung nach allen Richtungen gegeben ist.

Gammastrahlen der Anfangsstrahlung und Neutronen

Vergleich der Dosen

8.79 In den vorstehenden Abschnitten dieses Kapitels sind die Gammastrahlen und Neutronen, die die Anfangsstrahlung einer Kernexplosion bilden, getrennt beschrieben worden. Es ist von Interesse, die aus diesen beiden Strahlungsarten empfangenen Dosen zu vergleichen und ihre gemeinsame Wirkung zu erörtern, da sie beide ähnliche Schäden an Menschen verursachen. Obwohl die Kernstrahlungsdosen nicht genau proportional zum Explosionswert sind, ist es doch auf die allgemeinen Schlußfolgerungen nicht von grundlegendem Einfluß, wenn eine solche Proportionalität angenommen wird.

8.80 In Bild 8.80 sind die Kurven aus Bild 8.35a und 8.71 für die Gammastrahlen- bzw. die Neutronendosen aus einer Luftexplosion von 1 kt zu Vergleichszwecken überlagert worden. Ferner ist eine Kurve eingezeichnet, die die gesamte biologische Dosis in rem in verschiedenen Entfernungen von der 1-kt-Explosion angibt. Betrachtet man die Kurven für die Gammastrahlen- und Neutronendosen, so stellt man fest, daß in der Nähe des Explosionszentrums die Neutronendosis die größere von beiden ist. Jedoch nimmt bei zunehmender Entfernung die Neutronendosis rascher ab als die Gammastrahlungsdosis, so daß von einem bestimmten Punkt an die Gammastrahlen vorherrschend sind; und schließlich werden die Neutronen im Vergleich zu den Gammastrahlungen unbedeutend.

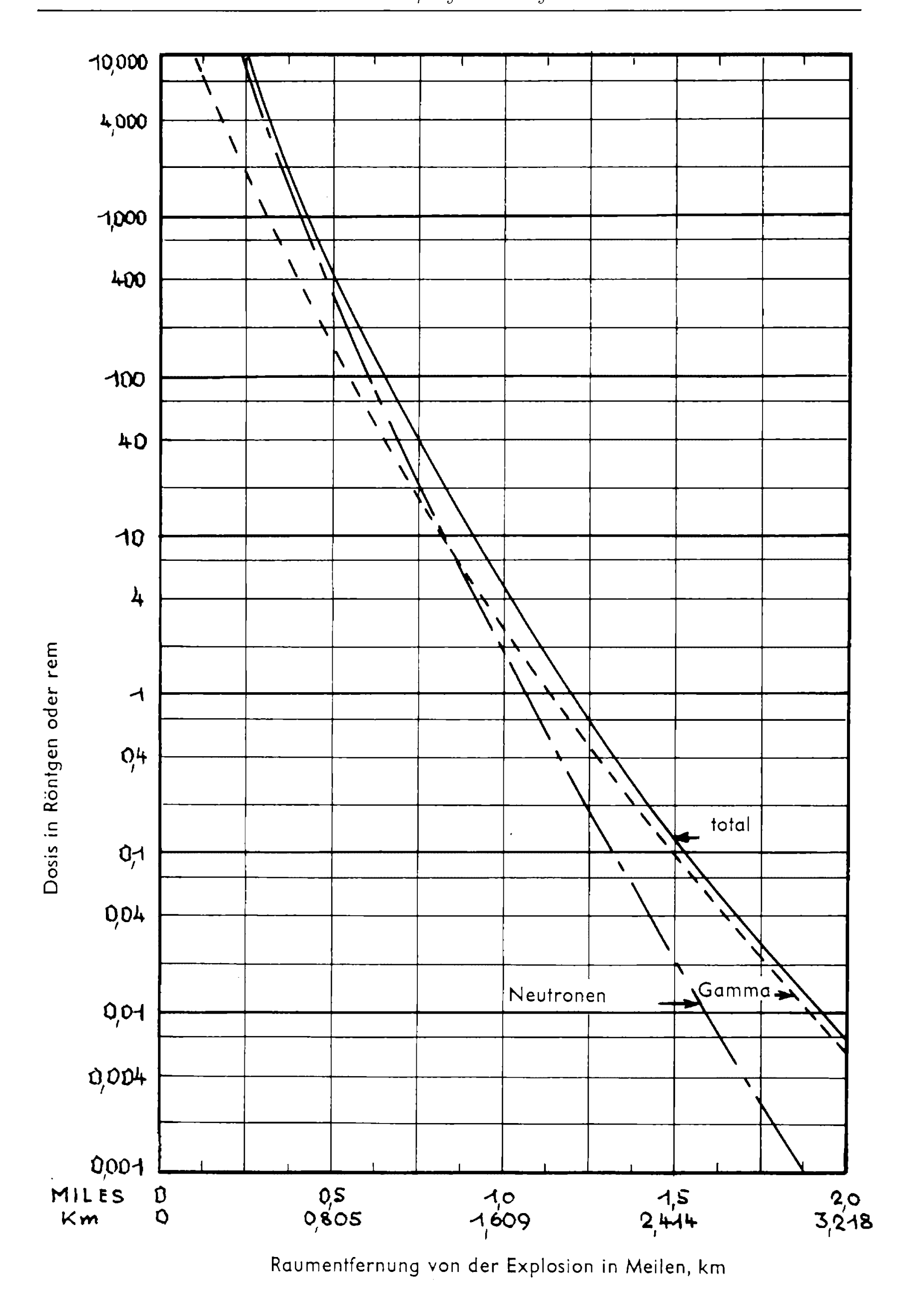


Bild 8.80 *Vergleich der Neutronen- und Anfangsgammastrahlendosen bei einer Luftexplosion von 1 kt*

Abhängigkeit vom Explosionswert

8.81 In Bild 8.81 ist ein weiterer interessanter Punkt in Zusammenhang mit dem eben erörterten dargestellt. Nehmen wir eine gesamte Anfangsstrahlendosis (biologische Dosis) von 600 bzw. 200 rem an, dann ersehen wir aus den Kurven die auf die Gammastrahlen und die Neutronen bei verschiedenen Explosionswerten entfallenden Anteile. Die angegebenen Werte für die Gesamtdosis sind gewählt worden, weil in diesem Bereich ein wirksamer Schutz durch eine Abschirmung von angemes-

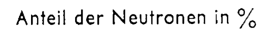


Bild 8.81 Relativer Anteil der Neutronen und der Anfangsgammastrahlung an der biologischen Gesamtdosis

sener Dicke, z. B. 90 cm Erde, möglich ist. Wir sehen aus Bild 8.81, daß unter den gegebenen Umständen der Anteil der Neutronen an der gesamten Strahlungsdosis nur bei Kernwaffen von geringem Explosionswert von Bedeutung ist. Bei mittleren und hohen Explosionswerten werden die Gammastrahlen relativ bedeutsamer.

8.82 Zu betonen ist, daß die vorstehenden Schlußfolgerungen nur für die angegebenen Gesamtstrahlungsdosen gelten. Die Raumentfernungen von der Explosion, in denen diese Dosen empfangen würden, erhält man durch Interpolation aus den Kurven in Bild 8.82, in dem das Verhältnis zwischen der gesamten Anfangsstrahlungsdosis, dem Explosionswert und der Entfernung angegeben ist. Bei größeren Dosen, d. h. bei kürzeren Entfernungen vom Nullpunkt, ist der Anteil der Neutronen in zunehmendem Maße größer. Die Art der Anfangsstrahlung an einem gegebenen Punkt wird also durch den Explosionswert und die empfangene Gesamtdosis bestimmt. Bei starken Dosen oder geringen Explosionswerten stellen die Neutronen einen verhältnismäßig höheren Prozentsatz dar als die Gammastrahlen; bei mittleren Dosen oder hohen Explosionswerten verhält es sich umgekehrt.

Die technischen Grundlagen der Übertragung und Absorption von Kernstrahlen[1])

Wechselwirkung zwischen Gammastrahlen und Materie

8.83 Es gibt drei bedeutende Arten der Wechselwirkung zwischen Gammastrahlen und Materie, durch die die Gammastrahlen gestreut und absorbiert werden. Die erste ist der sog. »Compton-Effekt«. Hierbei stößt das Gammastrahlenphoton mit einem Elektron eines Atoms zusammen; dadurch wird ein Teil der Energie des Photons an das Elektron übertragen. Das Photon mit seiner verringerten Energie bewegt sich dann in einem Winkel zu seiner ursprünglichen Richtung fort, d. h., der Gammastrahl wird durch den Compton-Effekt an die Materie gestreut und verliert an Energie.

8.84 Das gesamte Ausmaß der Comptonstreuung je Atom der Materie, auf welche die Strahlung einwirkt, ist proportional zur Anzahl der Elektronen in dem Atom, d. h. zur Atomzahl (Abschn. 1.8). Es ist also je Atom bei einem Element von hoher Atomzahl größer als bei einem Element von niedriger Atomzahl. Die Comptonstreuung nimmt rasch mit zunehmender Energie der Gammastrahlung bei allen Materialien ohne Rücksicht auf ihr Atomgewicht ab.

8.85 Die zweite Art der Wechselwirkung zwischen Gammastrahlen und Materie ist der »photoelektrische Effekt«. Ein Photon, dessen Energie etwas höher ist als die Bindungsenergie eines Elektrons in einem Atom, überträgt all seine Energie an das

[1]) Die restlichen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

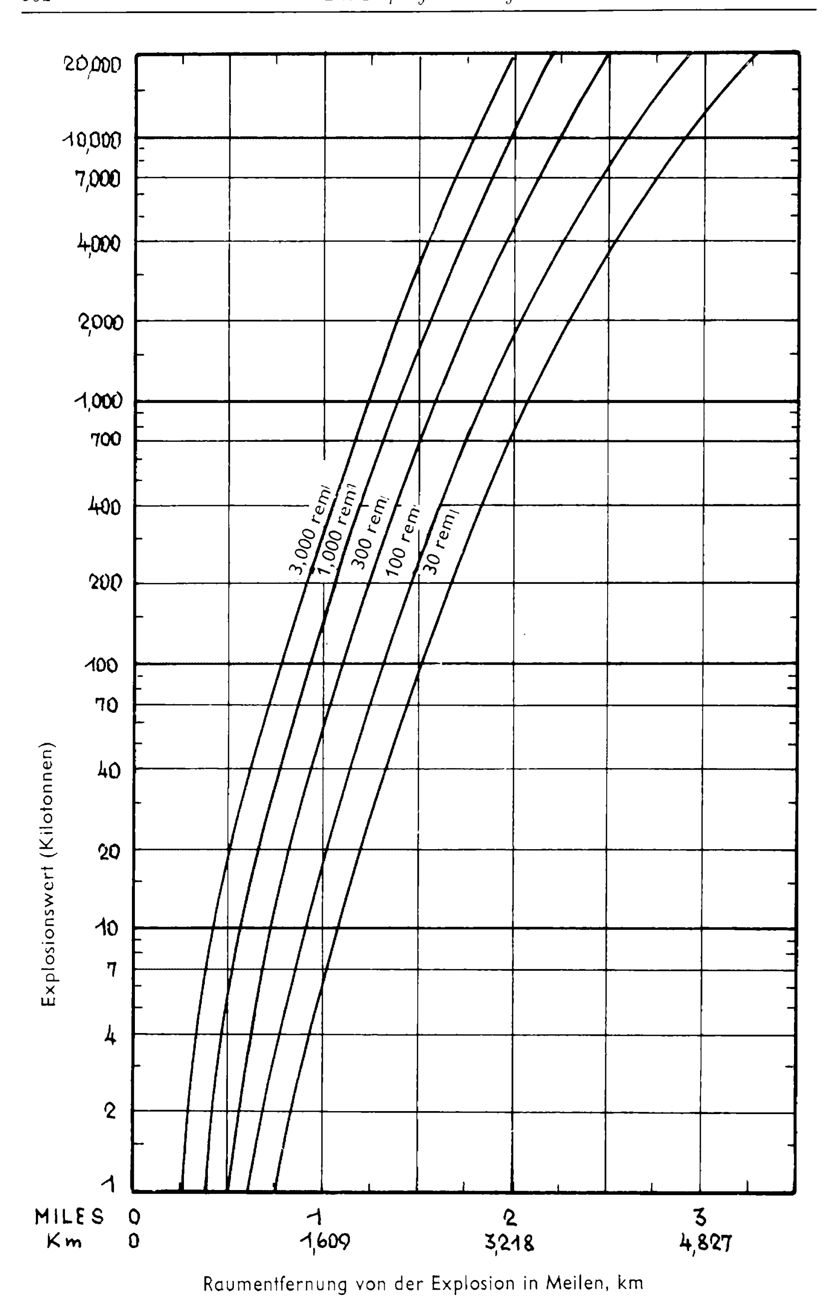


Bild 8.82 *Wirkungsbereiche bestimmter Gesamtdosen Anfangsstrahlung (Neutronen und Anfangsgammastrahlen)*

Elektron, das daraufhin von dem Atom abgespalten wird. Da das von dem photoelektrischen Effekt betroffene Photon seine gesamte Energie verliert, hört es auf zu existieren. Hierin unterscheidet es sich von dem Comptoneffekt, bei dem das Photon nach der Wechselwirkung noch bestehen bleibt, wenn auch seine Energie sich verringert hat. Die Größe des photoelektrischen Effekts je Atom steigt – ebenso wie die des Comptoneffekts – mit der Atomzahl des Materials, durch welches die Gammastrahlen hindurchgehen, und nimmt sehr rasch mit zunehmender Energie des Photons ab.

8.86 Eine Wechselwirkung zwischen Gammastrahlung und Materie kann noch auf eine dritte Weise erfolgen, nämlich durch »Paarbildung«. Wenn ein Gammastrahlenphoton mit einer Energie von mehr als 1,02 MeV nahe an dem Kern eines Atoms vorbeikommt, kann das Photon bei Bildung eines Teilchenpaares, bestehend aus einem positiven und einem negativen Elektron, in Materie umgewandelt werden. Wie bei dem photoelektrischen Effekt verschwindet durch die Paarbildung das betreffende Gammastrahlenphoton. Jedoch findet zwischen dem positiven und dem negativen Elektron eine Wechselwirkung statt, indem sich zwei Photonen von geringerer Energie als der ursprünglichen bilden. Das Auftreten der Paarbildung je Atom nimmt – ebenso wie bei den anderen Wechselwirkungen – mit der Atomzahl des Materials, aber auch mit der über 1,02 MeV hinausgehenden Energie des Photons zu.

8.87 Bei der Betrachtung dieser drei Arten von Wechselwirkungen sehen wir, daß die Größe je Atom in allen Fällen mit zunehmender Atomzahl (oder zunehmendem Atomgewicht) des Materials wächst, durch welches die Gammastrahlen hindurchgehen. Bei jeder Wirkung erfolgt auch entweder die vollständige Beseitigung von Photonen oder eine Verringerung ihrer Energie. Das Endergebnis ist eine Schwächung der Gammastrahlenintensität oder Dosis. Da zwischen Atomgewicht und Dichte eine ungefähre Parallelität besteht, ist die Atomzahl je Volumeneinheit bei den einzelnen Substanzen nicht sehr verschieden. Deshalb ist ein gegebenes Volumen (oder eine gegebene Dicke) eines Materials, welches Elemente von hohem Atomgewicht (»schwere Elemente«) enthält, als Abschirmung gegen Gammastrahlen wirksamer als das gleiche Volumen (oder die gleiche Dicke) eines Materials, welches nur aus Elementen von niedrigem Atomgewicht (»leichten Elementen«) besteht. Nachstehend ist dieser Unterschied des Verhaltens veranschaulicht.

8.88 Ein weiterer bedeutsamer Punkt liegt darin, daß die Wahrscheinlichkeit des Compton- und des photoelektrischen Effekts (je Atom) mit zunehmender Energie des Gammastrahlenphotons abnimmt. Die Paarbildung, die bei 1,02 MeV beginnt, nimmt jedoch mit der diesen Wert übersteigenden Energie zu. Eine Verbindung der verschiedenen Schwächungseffekte, von denen zwei sich mit zunehmender Photonenenergie verringern, während einer zunimmt, bedeutet, daß bei einer Energie von mehr als 1,02 MeV die Absorption von Gammastrahlen durch ein bestimmtes Material am geringsten sein müßte. Daß es ein solches Minimum gibt, werden wir bald sehen.

Gammastrahlenabsorptions-Koeffizienten

8.89 Wenn ein engeres (oder gerichtetes) Gammastrahlenbündel von bestimmter Energie, dessen Intensität I_0[1]) ist, auf ein bestimmtes Material von einer Dicke x fällt, dann kann die Intensität I der austretenden Strahlen durch die Gleichung

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (8.89.1)$$

ausgedrückt werden, wobei μ der sog. »lineare Absorptionskoeffizient« ist. Die Entfernung x wird für gewöhnlich in cm ausgedrückt, so daß die entsprechenden Einheiten für μ reziproke Zentimeter sind (cm^{-1}). Der Wert μ für das Material und für Gammastrahlen bestimmter Energie ist proportional der Summe des Compton-, des photoelektrischen und des Paarbildungseffekts. Wir sehen aus Gleichung 8.89.1, daß bei einer gegebenen Dicke x des Materials die Intensität oder Dosis I der austretenden Gammastrahlen um so geringer ist, je größer der Wert μ ist. Mit anderen Worten: der lineare Absorptionskoeffizient ist ein Maßstab für die Abschirmungsfähigkeit einer bestimmten Materialdicke, z. B. 1 cm oder 1 Fuß usw.

8.90 Der Wert μ kann in jedem Falle mit Hilfe der Gleichung 8.89.1 ermittelt werden, indem man die Gammastrahlenintensität (oder Dosis) vor (I_0) und nach (I) dem Durchdringen einer bekannten Materialdicke x feststellt. Einige der auf diese Weise erhaltenen Meßwerte für Gammastrahlen mit Energien von 0,5 bis 10 MeV sind in Tabelle 8.90 aufgeführt. Die für Beton aufgeführten Werte gelten für gewöhnlichen Beton mit einer Dichte von 2,3 g/cm³. Bei besonderen, schweren Betonarten, die Eisen, Eisenoxyd oder Bariumoxyd enthalten, erhöhen sich die Koeffizienten ungefähr proportional zur Dichte.

8.91 Durch geeignete Messungen und theoretische Berechnungen kann man die einzelnen Anteile des Comptoneffekts (μ_c), des photoelektrischen Effekts (μ_{pe}) und der Paarbildung (μ_{pp}) an dem gesamten linearen Absorptionskoeffizienten ermitteln. Die Ergebnisse für Blei, ein typisch schweres Element (mit hohem Atomgewicht),

Tabelle 8.90 Lineare Absorptionskoeffizienten für Gammastrahlen

Gammastrahlen-energie in MeV	Linearer Absorptionskoeffizient (μ) in cm^{-1}				
	Luft	Wasser	Beton	Eisen	Blei
0,5	$1{,}11 \times 10^{-4}$	0,097	0,22	0,66	1,7
1,0	$0{,}81 \times 10^{-4}$	0,071	0,15	0,47	0,80
2,0	$0{,}57 \times 10^{-4}$	0,049	0,11	0,33	0,52
3,0	$0{,}46 \times 10^{-4}$	0,040	0,088	0,28	0,47
4,0	$0{,}41 \times 10^{-4}$	0,034	0,078	0,26	0,47
5,0	$0{,}35 \times 10^{-4}$	0,030	0,071	0,25	0,50
10	$0{,}26 \times 10^{-4}$	0,022	0,060	0,23	0,61

[1]) Die Strahlungsintensität ist die Geschwindigkeit, mit welcher die Energie (aus monoenergetischer Strahlung) durch die Flächeneinheit an einem gegebenen Punkt fließt. Sie ist im wesentlichen proportional zur Expositionsdosisleistung. Es kann jedoch eine Formel in der Art der Gleichung 8.89.1 angewandt werden, um die Schwächung der an einem bestimmten Punkt durch Abschirmung oder durch die dazwischenliegende Luft empfangenen Gesamtdosis zu ermitteln.

das einen hohen Absorptionskoeffizienten hat, sind in Bild 8.91a angegeben; die Ergebnisse für Luft, ein Gemisch leichter Elemente von geringem Atomgewicht) mit einem niedrigen Absorptionskoeffizienten sind in Bild 8.91b angegeben. Wir sehen, daß bei geringen Gammastrahlenenergien der lineare Absorptionskoeffizient sich in jedem Falle mit zunehmender Energie verringert. Dies gilt offenbar für den Compton- sowie für den photoelektrischen Effekt (s. o.). Bei Energien von mehr als 1,02 MeV beginnt die Paarbildung, einen zunehmend bedeutsamen Anteil auszumachen. Deshalb beginnt der Absorptionskoeffizient bei genügend hohen Energien zu steigen, nachdem er bei einem Minimum angelangt war. Dies geht sowohl aus Bild 8.91a als auch aus der letzten Spalte von Tabelle 8.90 in bezug auf Blei hervor. Bei Elementen von geringerem Atomgewicht setzt die Zunahme nicht ein, ehe sehr hohe Gammastrahlenenergien erreicht sind, z. B. etwa 17 MeV bei Beton und 50 MeV bei Wasser.

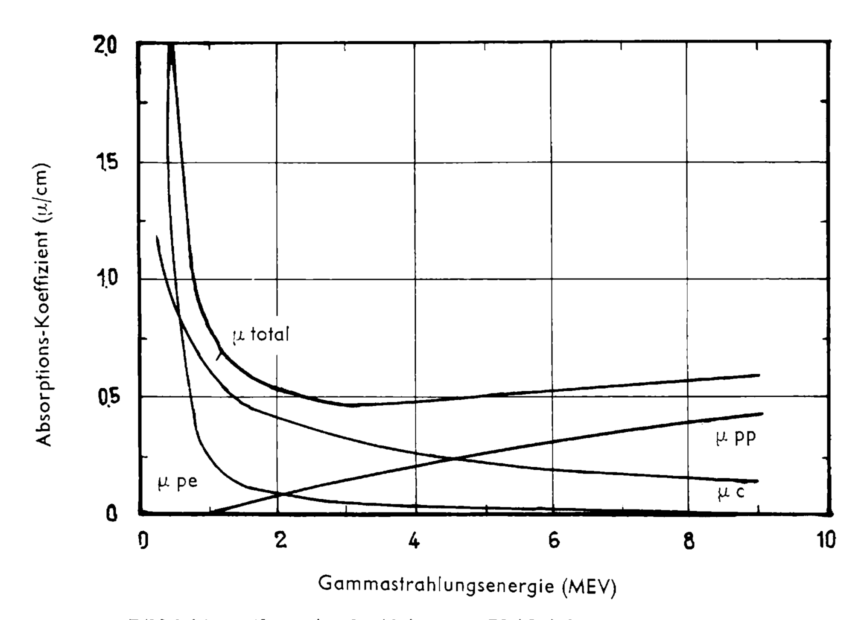


Bild 8.91a Absorptionskoeffizient von Blei bei Gammastrahlungen

8.92 Die Tatsache, daß der Absorptionskoeffizient mit zunehmender Gammastrahlenenergie abnimmt und einen Mindestwert haben kann, ist von großer Bedeutung für das Problem der Abschirmung. Zum Beispiel ist eine Abschirmung, die Gammastrahlen von 1 MeV Energie abschwächen soll, bei Strahlungen von 10 MeV Energie wegen des niedrigen Wertes des Absorptionskoeffizienten viel weniger wirksam, ungeachtet des Materials, aus dem die Abschirmung besteht. Die Anfangsgammastrahlen aus einer Kernexplosion erstrecken sich auf einen großen Energienbereich, bis zu 10 MeV oder mehr. Aber für die Zwecke ungefährer Abschirmungs-

berechnungen scheint ein empirischer (oder effektiver) Wert von 4,5 MeV ausreichende Ergebnisse zu bringen. (Diese Ziffer gilt nicht für die Rückstandsstrahlung, wie wir in Kap. IX sehen werden.)

8.93 Eine Betrachtung der Tabelle 8.90 zeigt, daß bei jedem Energiewert die linearen Absorptionskoeffizienten von links nach rechts, d. h. mit zunehmender Dichte des Materials, zunehmen. So schwächt eine bestimmte Dicke einer dichten Substanz die Gammastrahlung mehr ab als die gleiche Dicke eines weniger dichten Materials. Dies stimmt mit der in Abschn. 8.41 gemachten Feststellung überein, daß eine geringe Dicke einer Substanz von hoher Dichte eine ebenso wirksame Gammastrahlenabschirmung ergibt wie eine größere Dicke eines Materials geringerer Dichte.

Massenabsorptions-Koeffizient

8.94 Als sehr grobe Annäherung ist festgestellt worden, daß der lineare Absorptionskoeffizient für Gammastrahlen von bestimmter Energie proportional zur Dichte des absorbierenden (abschirmenden) Materials ist. Das heißt, der lineare Absorptionskoeffizient, dividiert durch die Dichte, ergibt den sog. »Massenabsorptions-Koeffizienten«, der bei allen Substanzen bei bestimmter Gammastrahlenenergie ungefähr gleich ist. Das gilt insbesondere für Elemente von geringem und mittlerem Atomgewicht bis zum Atomgewicht von Eisen (etwa 56), bei dem bei Energien bis zu einigen Millionen Elektronenvolt der größte Anteil des Absorptionskoeffizienten auf den

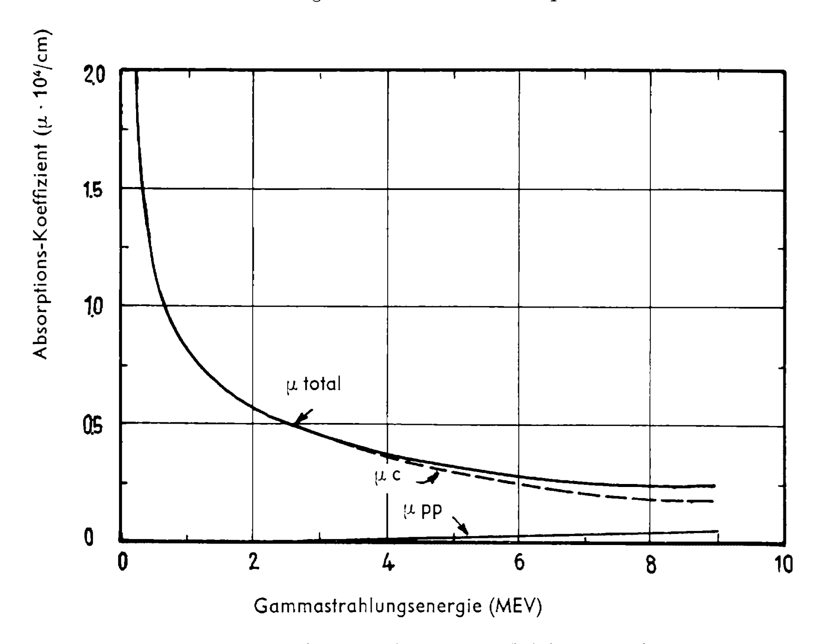


Bild 8.91b Absorptionskoeffizient von Luft bei Gammastrahlungen

Comptoneffekt entfällt (Bild 8.91b). Bei Anfangsgammastrahlen hat der effektive Massenabsorptions-Koeffizient bei Wasser, Beton, Erde und Eisen einen nahe bei 0,021 liegenden Wert, wobei die Dichte in g/cm³ ausgedrückt ist[1]).

8.95 Wenn das Zeichen ϱ für die Dichte des Abschirmungsmaterials verwendet wird, dann kann die Gleichung 8.89.1 wie folgt neu geschrieben werden:

$$I_0/I = e^{\mu x} = e^{(\mu/\varrho)(\varrho x)}, \tag{8.95.1}$$

wobei I_0/I der Abschwächungsfaktor (s. Definition in Abschn. 8.46) der Abschirmung von x cm Dicke ist; nach der Definition ist μ/ϱ der Massenabsorptions-Koeffizient. Wenn wir bei Anfangsgammastrahlen μ/ϱ mit 0,021 annehmen, folgt aus Gleichung 8.95.1, daß der

$$\text{Abschwächungsfaktor} = e^{0,021\,\varrho x}$$

ist, so daß der Abschwächungsfaktor von x cm dickem Material von bekannter Dichte mit guter Annäherung errechnet werden kann, vorausgesetzt, daß das Material aus Elementen von niedrigem oder mittlerem Atomgewicht besteht.

Halb- und Zehntelwertschichten

8.96 Eine Halbwertschicht (s. Definition in Abschn. 8.42) ist die Dicke eines Materials, die eine bestimmte (monoenergetische) Gammastrahlung um einen Faktor 2 abschwächt. Wenn wir also in Gleichung 8.89.1 $I/I_0 = 1/2$ annehmen, ist

$$e^{-\mu x_{1/2}} = {}^1/_2 \tag{8.96.1}$$

wobei $x_{1/2}$ die Halbwertdicke in cm ist. Aus Gleichung 8.96.1 geht klar hervor, daß

$$x_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} \tag{8.96.2}$$

ist. Die Halbwertdicke ist also umgekehrt proportional zum linearen Absorptionskoeffizienten des Materials bei bestimmten Gammastrahlen. Wir sehen, daß sie von der Strahlungsintensität (oder Dosis) unabhängig ist.

8.97 Wenn der Massenabsorptions-Koeffizient μ/p bei Gammastrahlen in der Anfangsstrahlung als konstant angenommen werden kann, d. h. mit 0,021, dann ergibt sich aus Gleichung 8.96.2, daß

$$x_{1/2} = \frac{0,693}{0,021} \cdot \frac{1}{\varrho} = \frac{33}{\varrho}\ \text{cm}$$

ist, wobei $x_{1/2}$ in cm und das Raumgewicht ϱ in g/cm³ ausgedrückt ist. Bei gewöhnlichem Beton z. B. beträgt die Dichte 2,3 g/cm³, so daß $x_{1/2}$ etwa 14 cm ist (s. Tabelle 8.44).

[1]) Bei Annahme eines effektiven Massenabsorptions-Koeffizienten von 0,021 ist versucht worden, die für dicke Abschirmungen oder breite Strahlenbündel geltenden Bedingungen zu berücksichtigen (s. Abschn. 8.99ff).

8.98 Bei einer Zehntelwertdicke ist $I/I_0 = 0{,}1$. Die Dicke $x_{0,1}$ erhält man danach aus Gleichung 8.89.1 als

$$x_{0,1} = \frac{2{,}30}{\mu} \text{ cm},$$

und bei Anfangsgammastrahlen aus einer Kernexplosion stellt

$$x_{0,1} = \frac{110}{\varrho} \text{ cm}$$

eine gute Annäherung dar.

Bei Beton beträgt die Zehntelwertdicke etwa 48 cm.

Dicke Abschirmungen: der Aufbaufaktor

8.99 Die Gleichung 8.89.1 ist nur in solchen Fällen genau anwendbar, in denen die bei den Wechselwirkungen des Comptoneffektes gestreuten Photonen als im wesentlichen aus dem Gammastrahlenbündel beseitigt angesehen werden können. Dies ist der Fall bei engen Strahlenbündeln oder bei Abschirmungen von mäßiger Dicke, aber nicht bei breiten Strahlenbündeln oder dicken Abschirmungen. Im letzteren Falle kann das Photon mehrere Male gestreut werden, bevor es aus der Abschirmung heraustritt. Bei breiten Strahlenbündeln und dicken Abschirmungen, wie sie bei der Abschirmung gegen Kernexplosionen in Frage kommen, ist der Wert I, die Intensität (oder Dosis) der heraustretenden Strahlung, größer als in Gleichung 8.89.1 angegeben. Die mehrfache Streuung der Strahlung wird dadurch berücksichtigt, daß man einen »Aufbau«-Faktor (Build-up-Faktor) mit einschließt, der durch $B(x)$ ausgedrückt wird und dessen Wert von der Dicke der Abschirmung abhängt; die Gleichung 8.89.1 lautet also nunmehr wie folgt:

$$I = I_0 B(x) e^{-\mu x}.$$

8.100 Der Wert des Aufbaufaktors ist für eine Anzahl von Elementen aus theoretischen Betrachtungen der Streuung von Photonen durch Elektronen errechnet worden. Die Aufbaufaktoren bei monoenergetischen Gammastrahlen mit Energien von 4 bzw. 1 MeV sind in Bild 8.100a und b als Funktion der Atomzahl des absorbierenden Materials bei Abschirmungen verschiedener Dicke, ausgedrückt in μx, d. h. nach der Anzahl der Relaxationslängen, angegeben. Die Aufbaufaktoren in Bild 8.100a können für die Absorption der Anfangsgammastrahlung als gute Annäherung angewandt werden, und die Aufbaufaktoren aus Bild 8.100b können für Abschirmungsberechnungen verwendet werden, die sich auf die Rückstandsstrahlung beziehen (s. Kap. IX).

8.101 Aus der vorstehenden Überlegung geht hervor, daß der Begriff der Halbwert-(und Zehntelwert-)Dicke nur bei monoenergetischen Strahlungen und dünnen Abschirmungen, bei denen der Aufbaufaktor gleich eins ist, angewandt werden kann.

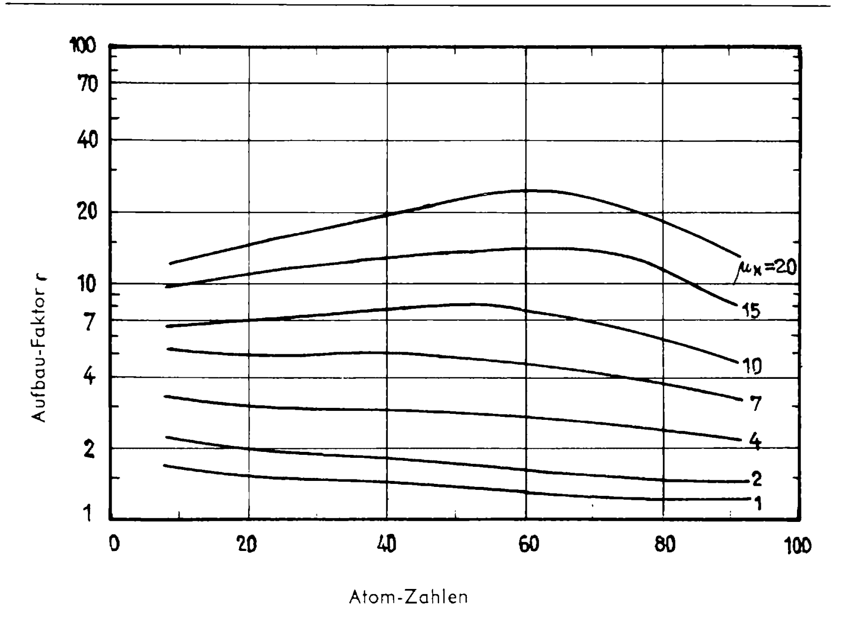


Bild 8.100a *Aufbaufaktor als Funktion der Atomzahl bei Gammastrahlen der Anfangsstrahlung (4,0 MeV)*

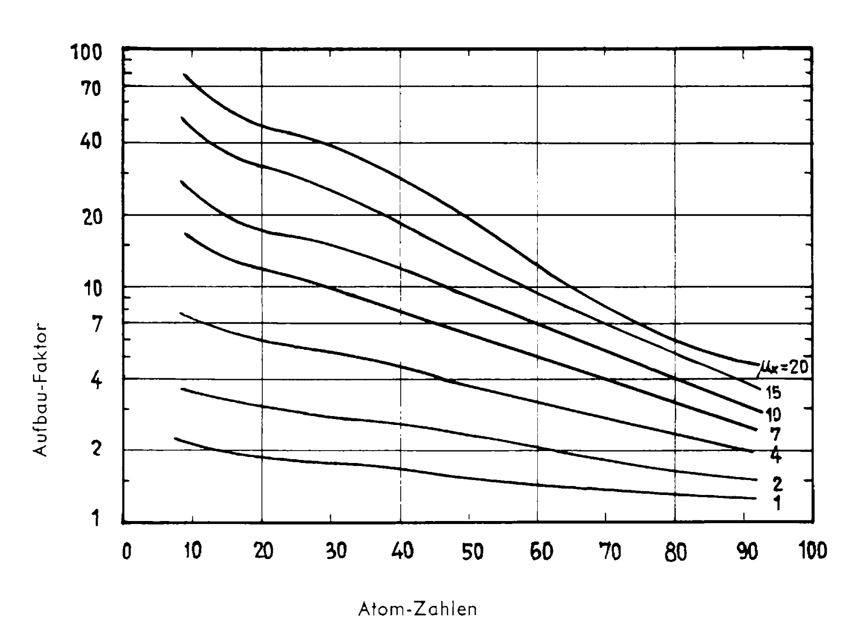


Bild 8.100b *Aufbaufaktor als Funktion der Atomzahl bei Gammastrahlen der Rückstandsstrahlung (1,0 MeV)*

Indem wir jedoch den Massenabsorptions-Koeffizienten bei der Anfangsgammastrahlung mit 0,021 (s. Abschn. 8.94) angenommen haben, sind sowohl die polyenergetische Art der Gammastrahlungen aus einer Kernexplosion als auch die Aufbaufaktoren auf Grund der mehrfachen Streuung der Photonen ungefähr (empirisch) berücksichtigt oder berichtigt worden. Infolgedessen gelten die in Abschn. 8.96 und 8.98 für $x_{1/2}$ und $x_{0,1}$ angeführten Formelausdrücke ziemlich genau für die Schwächung der Anfangsgammastrahlungen durch dicke Abschirmungen. Es mag auch erwähnt werden, daß die Abschwächungsfaktoren aus Bild 8.47 ebenfalls eine mehrfache Streuung bei dicken Abschirmungen berücksichtigen.

Ausbreitung der Gammastrahlen von ihrer Quelle aus

8.102 In der vorstehenden Abhandlung ist die Quelle der Gammastrahlen, z. B. eine Kernexplosion, oder ihre Entfernung nicht erörtert worden. Erörtert wurde nur das Verhältnis der Intensität der einfallenden Strahlung auf eine Materialdicke, die durch Schwächung der Strahlung als Abschirmung wirkt, zur Intensität (oder Dosis) der aus der Abschirmung heraustretenden Strahlung. Der Zusammenhang zwischen der einfallenden Dosis, die mit I_0 bezeichnet wird, und der Art der Strahlenquelle, d. h. der Kernexplosion, erfordert die Berücksichtigung zweier Faktoren. Diese sind erstens das quadratische Abstandsgesetz für die Verringerung der Dosis mit zunehmender Entfernung auf Grund der Ausbreitung der Strahlung über einen großen Raum, zweitens die Schwächung auf Grund der Streuung und Absorption in der Atmosphäre. Der letztere Gesichtspunkt des Problems unterscheidet sich jedoch nicht wesentlich von dem vorstehend im Zusammenhang mit der Abschirmung erörterten.

8.103 Da die in Frage kommenden Entfernungen vergleichsweise groß sind, kann der explodierende Atomsprengkörper als eine Punktquelle angesehen werden, die insgesamt R_γ Anfangsgammastrahlung emittiert, in entsprechenden Einheiten ausgedrückt. Also werden in einer Entfernung D von der Explosion – abgesehen von den Verlusten auf Grund der Schwächung durch die dazwischenliegende Luft – $R_r/4\pi D^2$ je Flächeneinheit empfangen. Dies sollte mittels der Gleichung 8.99.1 berücksichtigt werden, da bei den in Frage kommenden Entfernungen der Aufbaufaktor sehr viel höher als 1 liegt. Es ist jedoch einfacher, die Gleichung 8.89.1 zu verwenden und den Absorptionskoeffizienten so zu berichtigen, daß er in die Ergebnisse paßt. Es ergibt sich also, daß I_0, als Strahlungsdosis ausgedrückt, (ungefähr) durch folgende Gleichung dargestellt werden kann:

$$I_0 = \frac{R_\gamma}{4\pi D^2} e^{-\mu D} \qquad (8.103.1)$$

Hierbei gilt μ nicht für eine bestimmte Energie, sondern stellt nur einen empirischen Mittelwert für den in der Anfangsstrahlung vorhandenen Photonenenergiebereich dar.

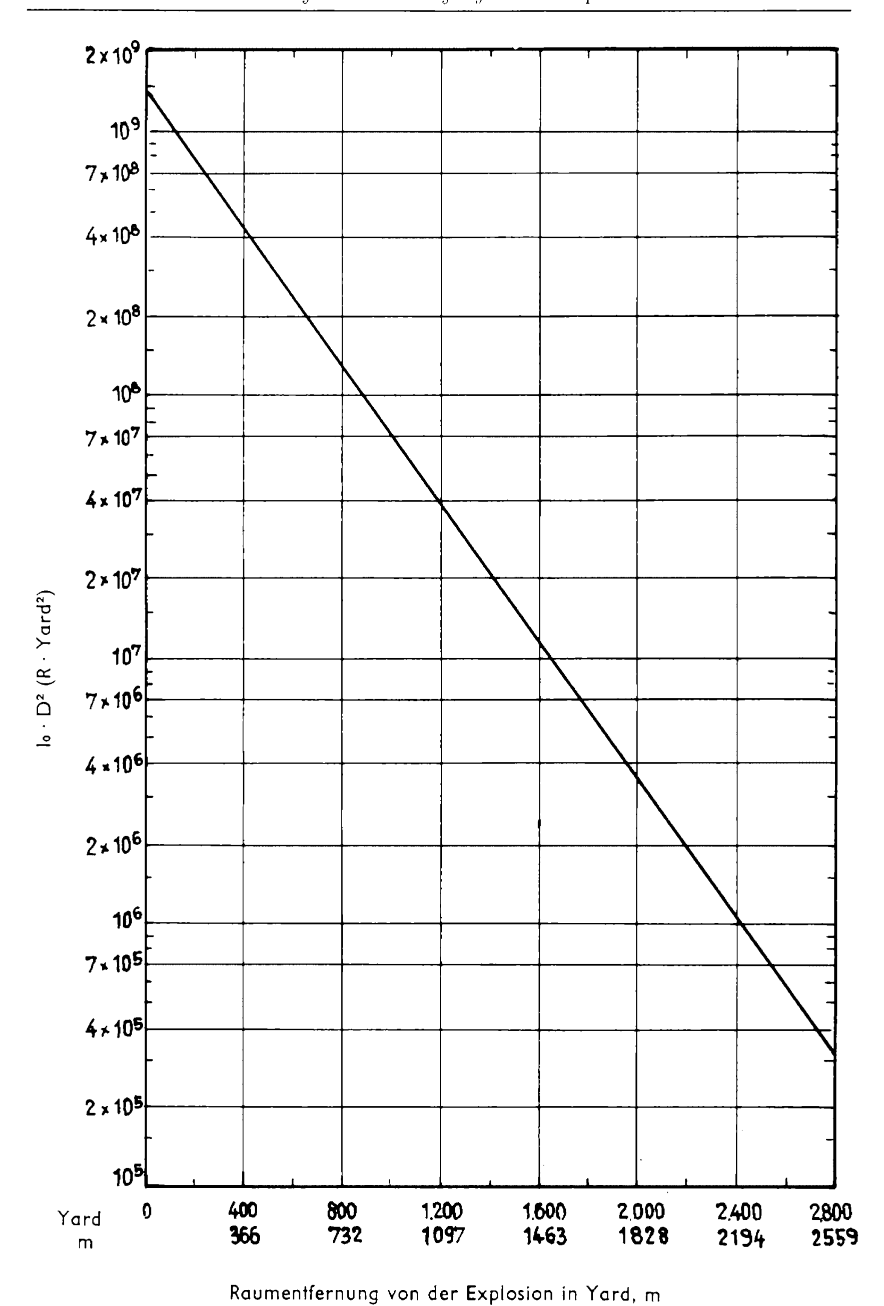


Bild 8.105 *(Anfangsgammastrahlen-Dosis × Entfernung)² in Abhängigkeit von der Entfernung bei einer 1-kt-Explosion*

8.104 Aus verschiedenen Gründen ist es zweckmäßig, μ durch $1/\lambda$ zu ersetzen, wobei λ die sog. »Relaxationslänge« der Strahlung ist. Sie stellt die Dicke des Materials, z. B. Luft, dar, die erforderlich ist, um die Strahlung um einen Faktor e, die Basis der Napierschen Logarithmen, abzuschwächen. Deshalb lautet die Gleichung 8.103.1 wie folgt:

$$I_0 = \frac{R\gamma}{4\pi D^2} e^{-D/\lambda} \qquad (8.104.1)$$

Hierbei ist I_0 die in einer Entfernung D von der Explosion ohne Abschirmung empfangene Gammastrahlendosis. In Bild 8.35a sind die Werte von I_0, in Röntgen ausgedrückt, für verschiedene Entfernungen von einer 1-kt-Explosion aufgezeichnet.

8.105 Durch Neugruppierung der Gleichung 8.104.1 in der Weise, daß die linke Seite $I_0 D^2$ wird, und durch Logarithmieren ergibt sich, daß

$$\lg (I_0 D^2) = \text{Konstante} - 0{,}4343 \frac{D}{\lambda} \text{ ist.}$$

Das bedeutet: wenn $I_0 D^2$ auf einer logarithmischen Skala über D auf einer linearen Skala aufgetragen wird, müßte das Ergebnis eine gerade Linie sein. Aus der Neigung dieser Linie, die gleich $0{,}4343/\lambda$ ist, kann die Relaxationslänge der Gammastrahlen errechnet werden. In Bild 8.105 ist ein Beispiel hierfür an Hand der Werte aus Bild 8.35a für eine 1-kt-Explosion gezeigt. Der Wert λ ist mit 338 Yards = 309 m errechnet, und aus dem Schnitt mit der Ordinatenachse folgt $R_\gamma/4\pi = 1{,}4 \times 10^9$ Röntgen·Yards² = 1,17 Röntgen · m². Die Formel nach Gleichung 8.104.1, die die Veränderung der Dosis in Röntgen (oder rem) mit der Entfernung D in Yards bzw. Metern darstellt, lautet dann wie folgt:

$$I_0 = \frac{1{,}4 \times 10^9}{D^2} e^{-D/333} \text{ Röntgen/kt} \quad (D \text{ in yds})$$

$$\text{bzw. } I_0 = \frac{1{,}17 \cdot 10^9}{D^2} \cdot e^{-D/309} \text{ Röntgen/kt} \quad (D \text{ in m})$$

bei einer 1-kt-Explosion.

8.106 Wenn die gesamte Anfangsgammastrahlung proportional zum Explosionswert ist und die Relaxationslänge der Photonen als konstant angenommen wird, dann kann man die aus einer W-kt-Explosion empfangene Dosis durch Multiplikation der oben angeführten Formel mit W ermitteln. Jedoch ist wegen des verringerten Luftdrucks während der Ausbreitung des verzögerten Teils der Anfangsgammastrahlen und aus anderen, in Abschn. 8.38 erwähnten Gründen der Wert λ bei Explosionswerten von mehr als etwa 20 kt größer als 338 Yards = 309 m und verändert sich mit dem Explosionswert. Anstatt dies zu berichtigen, ist es jedoch einfacher, anstelle des Explosionswertes W einen Umrechnungsfaktor W' zu verwenden, den man aus Bild 8.35b entnimmt. Die Gleichung für die Anfangsgamma-

strahlendosis in einer Entfernung von D Yards bzw. Metern von einer W-kt-Explosion lautet dann wie folgt:

$$I_0 = \frac{1{,}4 \times 10^9\, W'}{D^2}\, e^{-D/338} \text{ Röntgen} \quad (D \text{ in yds})$$

$$\text{bzw. } I_0 = \frac{1{,}17 \times 10^9\, W'}{D^2}\, e^{-D/309} \text{ Röntgen} \quad (D \text{ in m})$$

Das Neutronenenergie-Spektrum

8.107 Die in einiger Entfernung von einer Kernexplosion empfangene Neutronen-Energie erstreckt sich auf einen sehr großen Bereich von mehreren Millionen Elektronenvolt bis zum Bruchteil eines Elektronenvolts abwärts. Die Ermittlung des ganzen Energiespektrums durch Berechnung – was grundsätzlich möglich ist – oder durch Versuche ist praktisch unmöglich. Es muß deshalb zu Messungen der Neutronenintensitäten innerhalb einiger bestimmter Bereiche Zuflucht genommen werden; aus diesen Ergebnissen kann dann eine Vorstellung über das Spektrum gewonnen werden.

8.108 Messungen dieser Art werden durch Verwendung von »Schwellendetektoren« des aktivierten Folien- oder Spaltungsfolientyps durchgeführt (Abschn. 8.66, 8.67). Das Element Schwefel wird durch das Einfangen von Neutronen von höherer Energie als 2,5 MeV radioaktiv induziert (jedoch nicht, wenn die Neutronen geringere Energien aufweisen). Deshalb ist das Ausmaß der Aktivierung einer Schwefelfolie ein Maßstab für die Intensität von Neutronen mit Energien über 2,5 MeV. In ähnlicher Weise erfordert die Spaltung von Uran-238 Neutronen mit einer Energie von mindestens 1,5 MeV, so daß aus der Aktivität der Spaltungsprodukte die Intensität der Neutronen mit mehr als 1,5 MeV Energie ermittelt werden kann. Die Differenz zwischen den beiden auf diese Weise gewonnenen Ergebnissen ergibt die Neutronen-Intensität im Energiebereich von 1,5 bis 2,5 MeV. Andere Folienmaterialien, die auf die gleiche Weise verwendet werden, sind Neptunium-237, Spaltungsschwelle 0,7 MeV; ferner Plutonium-239 (mit Borium abgeschirmt), Spaltungsschwelle 100 eV, und Gold, das durch langsame Neutronen aktiviert wird.

8.109 Die Ergebnisse einer Reihe von Messungen, die in verschiedenen Entfernungen bei einem Kernexplosionsversuch angestellt wurden, sind in Bild 8.109 aufgezeigt. Hier ist ND^2 auf einer logarithmischen (senkrechten) Skala über D auf einer linearen (waagerechten) Skala aufgetragen. In diesem Falle stellt N die Neutronenanzahl je cm^2 dar, die eine Spaltung oder Aktivierung von Folien der angegebenen Materialien in einer Entfernung von D der Explosion erzeugen. Da die tatsächlichen Werte ND^2 für diesen Zweck nicht notwendig sind, sind in dem Bild die relativen Werte angegeben.

8.110 Wir sehen aus Bild 8.109, daß – wie zu erwarten – die einzelnen Linien sich nach rechts abwärts neigen, also mit zunehmender Entfernung von der Explosion

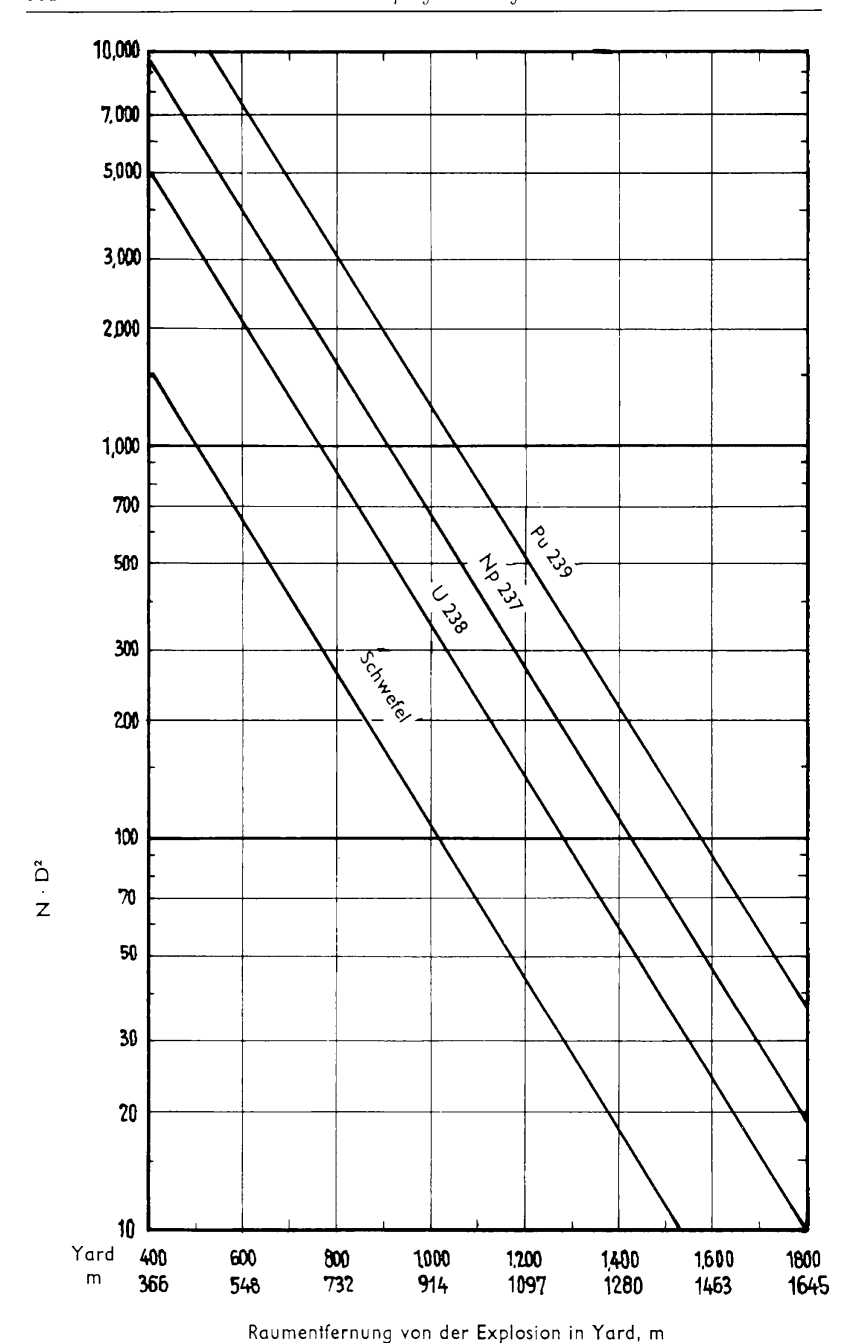


Bild 8.109 Typische Schwellen-Detektor-Ergebnisse für schnelle Neutronen in der Luft

eine ständige Verringerung der Neutronenintensität in allen Energiebereichen anzeigen. Der wirklich bedeutsame Tatbestand ist jedoch, daß alle Linien parallel laufen. Obwohl also die Gesamtzahl der je cm^2 empfangenen Neutronen mit zunehmender Entfernung geringer wird, bleiben die Proportionen in den verschiedenen Energiebereichen im wesentlichen durchweg gleich. Mit anderen Worten: in einem bedeutenden Entfernungsbereich haben wir ein Gleichgewichtsspektrum, in dem die Energieverteilung der Neutronen in der Anfangsstrahlung von der Entfernung von der Explosion unabhängig ist.

8.111 Hieraus ist zu schließen, daß es möglich sein müßte – wenn die Ergebnisse allgemein anwendbar sind, – die Neutronen als eine einzige Gruppe zu behandeln, mit einer bestimmten Energieverteilung jenseits einer gewissen Entfernung. Somit würde bei Annahme eines Gleichgewichtsspektrums eine Folienmessung ausreichend sein, um die gesamte Neutronendosis an einem gegebenen Punkt aufzuzeigen. Ferner würde der analytische Ansatz für die Veränderung der Neutronendosis mit der Entfernung vereinfacht.

8.112 Im Verhältnis zum Neutronen-Energiespektrum entfallen auf die langsamen Neutronen, deren Energie weniger als 1 eV beträgt, nicht mehr als 2% der gesamten Neutronendosis, die in Entfernungen von biologischem Interesse empfangen wird.

In den meisten Fällen können aber die thermischen Neutronen als Kernstrahlungsgefahr wohl unbeachtet bleiben. Etwa 75% der Dosis werden aus schnellen Neutronen mit Energien über 0,75 MeV empfangen[1]).

Ausbreitung der Neutronen von ihrer Quelle aus

8.113 Die Ausbreitung von Neutronen durch die Luft aus dem explodierenden Atomsprengkörper, die als Punktquelle behandelt wird, bis zu einem in größerer Entfernung gelegenen Punkt kann in ganz ähnlicher Weise dargestellt werden, wie vorstehend für die Gammastrahlen beschrieben. Wenn N_0 die gesamte in einer Entfernung D vom Explosionspunkt empfangene Neutronendosis ist, dann ist entsprechend der Gleichung 8.104.1

$$N_0 = \frac{R_n}{4\pi D^2} e^{-D/\lambda_n}, \qquad (8.113.1)$$

wobei R_n eine zum Explosionswert in Beziehung gesetzte Neutronendosis und λn hier die Relaxationslänge für Neutronen in der Luft ist. Da das Sprengkörper-Neutronenspektrum im wesentlichen unabhängig von der Entfernung ist, hat λ nur einen einzigen Wert, der ein gewogenes Mittel für alle Energien darstellt. Er ist gleichwertig mit der von der Strahlung in der Luft zurückgelegten Entfernung bei einer Verringerung der effektiven Neutronendosis um einen Faktor e.

[1]) Die meisten der bei der Spaltung erzeugten Neutronen haben Energien von 1–3 MeV, bevor sie verlangsamt werden. Die durch die Verschmelzungsreaktion zwischen Deuterium und Tritium erzeugten Neutronen haben eine Energie von 14 MeV.

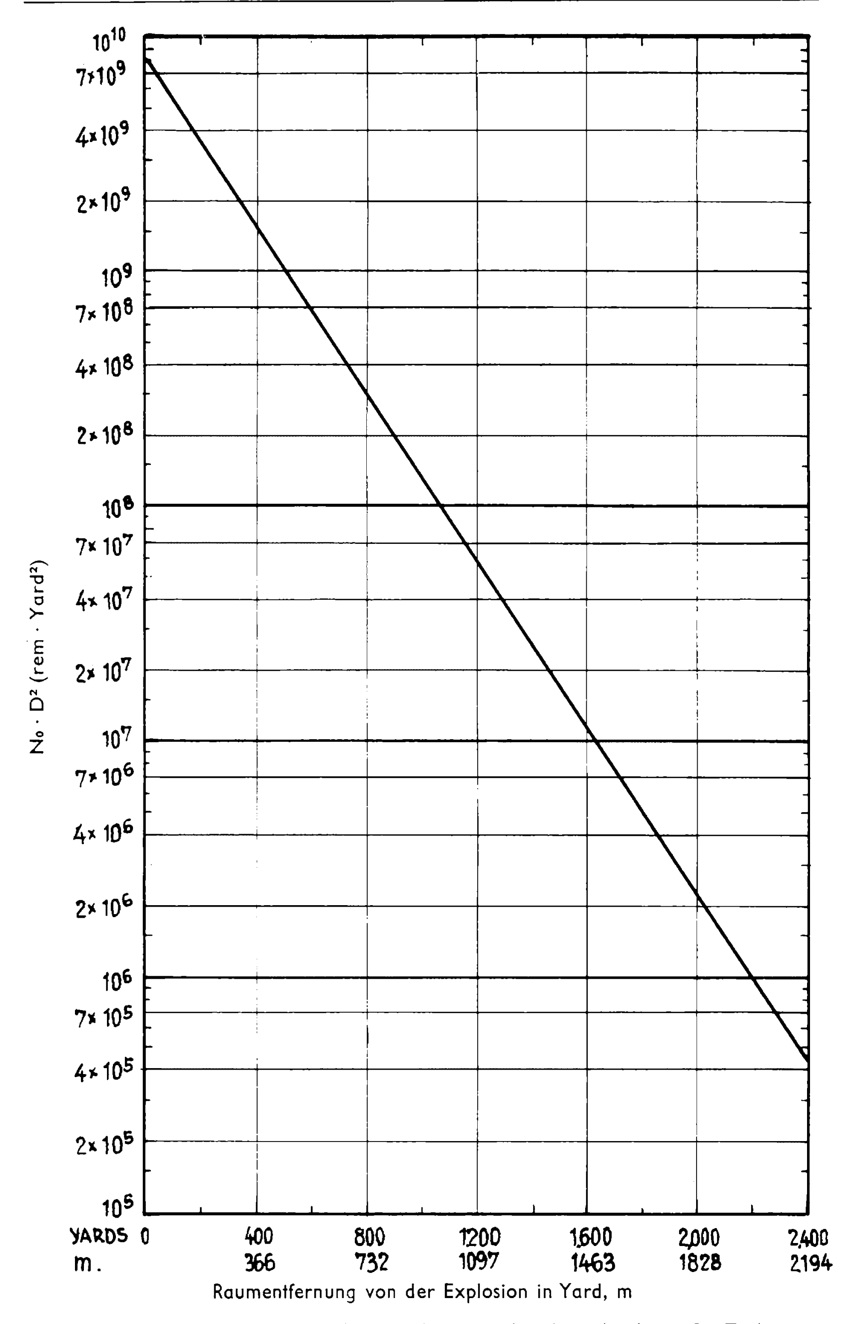


Bild 8.114 (Relative Neutronendosis × Entfernung)² in Abhängigkeit von der Entfernung bei einer 1-kt-Explosion

8.114 Wenn man die Gleichung 8.113.1 umgruppiert und logarithmiert, wie in Abschn. 8.105, dann ergibt sich

$$\lg N_0 D^2 = \text{Konstante} - 0{,}4343 \frac{D}{\lambda_n},$$

so daß eine halblogarithmische Auftragung von $N_0 D^2$ über D eine gerade Linie sein müßte. Die Werte in Bild 8.71, wo N_0 in rem als Funktion von D in *Yards* bzw. Metern bei einer 1-kt-Explosion angegeben ist, sind dazu verwendet worden, um das Bild 8.114 zu erhalten. Aus der Neigung der geraden Linie wird λ_n mit 242 yds = 221 m errechnet, und aus dem Schnitt mit der vertikalen Achse wird der Wert für $R_n/4\pi$ bei der 1-kt-Explosion als $8{,}4 \times 10^9$ rem · Yards² = $7 \cdot 10^9$ rem · m² ermittelt. Folglich ist, wenn wir annehmen, daß die Neutronendosis direkt proportional zum Explosionswert ist, – obwohl dies keine gute Annäherung darstellt – (s. Abschnitt 8.71)

$$N_0 = \frac{8{,}4 \times 10^9 W}{D^2} e^{-D/242}\text{rem} \quad (D \text{ in yds})$$

$$\text{bzw. } N_0 = \frac{7{,}0 \times 10^9 W}{D^2} e^{-D/221}\text{rem} \quad (D \text{ in m})$$

wobei W kt der Explosionswert ist; die Entfernung D von der Explosion ist hierbei in Yards bzw. Metern ausgedrückt.

8.115 Da die Relaxationslänge bei der Anfangsgammastrahlung 338 Yards = 309 m beträgt, während sie bei den Neutronen 242 Yards = 221 m beträgt, sehen wir, daß die Sprengkörperneutronen im Durchschnitt eine kürzere Entfernung in der Luft zurücklegen als die Anfangsgammastrahlen, bevor sie um den gleichen Faktor geschwächt werden. Dies ist die physikalische Grundlage für die in Abschn. 8.80 erwähnte Tatsache, daß die Neutronendosis mit zunehmender Entfernung von der Explosion rascher abnimmt als die Gammastrahlendosis.

Abschirmung gegen Neutronen

8.116 Die Abschwächung eines engen Neutronenbündels durch eine Abschirmung kann durch eine ähnliche Gleichung dargestellt werden, wie sie für die Gammastrahlen verwendet wird, nämlich

$$N = N_0 e^{-\Sigma \cdot x},$$

wobei N_0 die Dosis ist, die ohne die Abschirmung empfangen werden würde, und N die Dosis, die die Abschirmung von x cm Dicke durchdringt. Das Zeichen Σ bedeutet den makroskopischen Querschnitt, der dem linearen Absorptionskoeffizienten von Gammastrahlen äquivalent ist. Es gibt zwar einen spezifischen Wert von Σ für jede Neutronenenergie und für jede Reaktion des Neutrons. Jedoch wird bei der Berechnung von Abschirmungen ein empirischer Wert für Σ, der auf tatsächlichen Messun-

gen basiert, verwendet. Er stellt einen komplexen Durchschnitt für alle möglichen Neutronenwechselwirkungen im Bereich der in Frage kommenden Energien dar. Einige ungefähre Werte für Σ für schnelle Neutronen sind in Tabelle 8.116 enthalten; hierbei sind breite Neutronenbündel und dicke Abschirmungen berücksichtigt.

Tabelle 8.116 Empirische makroskopische Querschnitte für die Abschwächung von schnellen Neutronen

Material	Σ (cm^{-1})
Wasser	0,1
Beton	0,09
Stahlbeton	0,16

8.117 Ein verhältnismäßig großer makroskopischer Querschnitt bedeutet, daß eine geringere Dicke des Materials ebenso wirksam ist wie eine größere Dicke einer Substanz mit geringerem Querschnitt. So ist Beton, der Stahl enthält, wirksamer als gewöhnlicher Beton (Abschn. 8.76). Jedoch besteht keine einfache Wechselbeziehung zwischen der Schwächung von Neutronen und der Dichte des Materials, wie es in guter Annäherung bei den Gammastrahlen der Fall ist. Es muß abschließend betont werden, daß, wie in Abschn. 8.74 gesagt, eine ausreichende Abschirmung gegen Neutronen mehr leisten muß, als nur die schnellen Neutronen schwächen. Sie muß imstande sein, die verlangsamten Neutronen einzufangen und alle bei dem Einfangprozeß auftretenden Gammastrahlen zu absorbieren.

KAPITEL IX

Rückstandsstrahlung und radioaktiver Niederschlag

Die Quellen der Rückstandsstrahlung

Einleitung

9.1 Die Rückstandsstrahlung wird aus früher schon angegebenen Gründen als die Strahlung definiert, die eine Minute nach der Kernexplosion ausgestrahlt wird. Diese Strahlung entsteht hauptsächlich durch die Sprengkörperrückstände, d. h. durch die Spaltungsprodukte und – in geringerem Umfange – durch das Uran und Plutonium, die der Spaltung entgangen sind. Außerdem enthalten diese Überreste gewöhnlich noch einige radioaktive Isotope, die sich als Folge des Neutroneneinfangs durch die Materialien des Atomsprengkörpers gebildet haben (Abschn. 8.8). Eine weitere Quelle der Rückstandsstrahlung ist die Aktivität, die von den Neutronen induziert wird, welche in verschiedenen in der Erde, im Meer oder auch in Substanzen der Umgebung der Explosionsstelle vorhandenen Elementen eingefangen sind. Zu erwähnen ist noch, daß die durch die Gammastrahlen aus einer Kernexplosion induzierte Radioaktivität entweder unbedeutend oder gar nicht vorhanden ist.

9.2 Bei einer Luftexplosion kann, insbesondere, wenn der Feuerball sich ziemlich hoch über dem Erdboden befindet, eine hinreichend genaue Unterscheidung zwischen der im vorhergehenden Kapitel behandelten Anfangsstrahlung und der Rückstandsstrahlung gemacht werden. Der Grund dafür ist darin zu suchen, daß nach Ablauf einer Minute im wesentlichen alle Sprengkörperreste in Form sehr kleiner Teilchen zu einer solchen Höhe aufgestiegen sind, daß die Kernstrahlungen den Erdboden nicht mehr in größerem Umfang erreichen. Infolgedessen werden die feinen Teilchen weit in der Atmosphäre verstreut und fallen sehr langsam zur Erde nieder.

9.3 Bei Bodenexplosionen und besonders bei Untererdexplosionen ist die Abgrenzung zwischen der Anfangs- und der Rückstandsstrahlung nicht so eindeutig. Einige der aus Sprengkörperresten herrührenden Strahlen werden sich immer im Bereich der Erdoberfläche befinden, so daß sich die Anfangs- und Rückstandsstrahlen dauernd miteinander vermengen. Bei Untererd- und Unterwasserexplosionen in größerer Tiefe können durch Spaltungsprozesse erzeugte Anfangsgammastrahlen und Neutronen unberücksichtigt bleiben. Im wesentlichen ist nur die Kernstrahlung von Bedeutung, die von den Sprengkörperresten ausgeht. Sie kann infolgedessen so behandelt werden, als ob sie ausschließlich aus Rückstandsstrahlen bestünde. Aber bei einer Bodenexplosion müssen auch Anfangs- und Rückstandsstrahlen in Betracht gezogen werden.

Die Spaltungsprodukte

9.4 Wie in Kap. I festgestellt, stellen die Spaltungsprodukte eine sehr komplizierte Mischung aus über 200 verschiedenen Isotopen von 35 Elementen dar. Die meisten dieser Isotope sind radioaktiv und zerfallen durch die Ausstrahlung von Betateilchen; dabei werden häufig auch Gammastrahlen freigesetzt. Jede Kilotonne einer durch Spaltung freigesetzten Energiemenge erzeugt 50 g Spaltungsprodukte. Die gesamte Radioaktivität der Spaltungsprodukte ist anfangs außerordentlich groß, aber sie nimmt durch Zerfall mit ziemlicher Geschwindigkeit ab (Abschn. 1.23).

9.5 Eine Minute nach einer Kernexplosion – d. h. nachdem die Rückstandsstrahlung begonnen hat – ist die Radioaktivität aus 50 g Spaltungsprodukten bei einer 1-kt-Explosion mit der Radioaktivität von hunderttausend t Radium vergleichbar. Wir sehen also, daß bei Explosionen im Megatonnenbereich die Radioaktivität sehr groß ist. Obgleich sich die Radioaktivität nach der ersten Minute bis zum Ablauf von 24 Stunden um einen Faktor von über 6000 vermindert, ist die Strahlenintensität noch immer groß.

9.6 Man hat errechnet, daß – wenn die Produkte aus einer Explosion mit einem Explosionswert von einer Megatonne gleichmäßig über ein 25000 km^2 großes Gebiet verteilt werden könnten – die Strahlungsintensität 90 cm über dem Erdboden nach 24 Stunden 2,7 r pro Stunde betragen würde. Praktisch ist eine gleichmäßige Verteilung unwahrscheinlich, da sich in der Nähe des Nullpunktes ein größerer Teil der Spaltungsprodukte ablagern würde als an weiter entfernt gelegenen Stellen. Deshalb liegt die Strahlungsintensität in der Nähe des Explosionszentrums weit über dem Durchschnitt, während sie in viel größeren Entfernungen geringer ist.

9.7 Einen Hinweis auf die Geschwindigkeit, mit der die Radioaktivität der Spaltungsprodukte im Lauf der Zeit abnimmt, kann die folgende annähernde Regel darstellen: jede siebenfache Zeitverlängerung nach der Explosion reduziert die Aktivität um einen Faktor 10. Wenn z. B. die Strahlungsintensität eine Stunde nach der Explosion als Bezugspunkt genommen wird, dann hat die Intensität 7 Stunden nach der Explosion auf $^1/_{10}$ nachgelassen; in $7 \times 7 = 49$ Stunden (oder rund zwei Tagen) ist sie auf $^1/_{100}$ gesunken, und in $7 \times 7 \times 7 = 343$ Stunden (oder rund zwei Wochen) beträgt sie $^1/_{1000}$ der Radioaktivität, die eine Stunde nach der Explosion vorhanden war. Ein anderer Gesichtspunkt der Regel liegt darin, daß nach der ersten Woche (7 Tage) die Strahlung $^1/_{10}$ des nach dem ersten Tage vorhandenen Wertes beträgt. Diese Regel stimmt für rund 200 Tage; danach geht die Strahlungsintensität schneller zurück.

9.8 Angaben über das Nachlassen der Aktivität von Spaltungsprodukten sind aus Bild 9.8 zu entnehmen, in der die ungefähre Dosisleistung (in Röntgen pro Stunde) zu einem bestimmten Zeitpunkt nach der Explosion im Verhältnis zur Dosisleistung nach einer Stunde in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen ist. Wir sehen, daß die Dosisleistung eine Stunde nach der Explosion hier als Bezugswert angesetzt ist. Dies geschieht nur, um die Errechnung und Darstellung der Ergebnisse zu vereinfachen. Bei größeren Entfernungen von Explosionen mit hohem Explosionswert können die

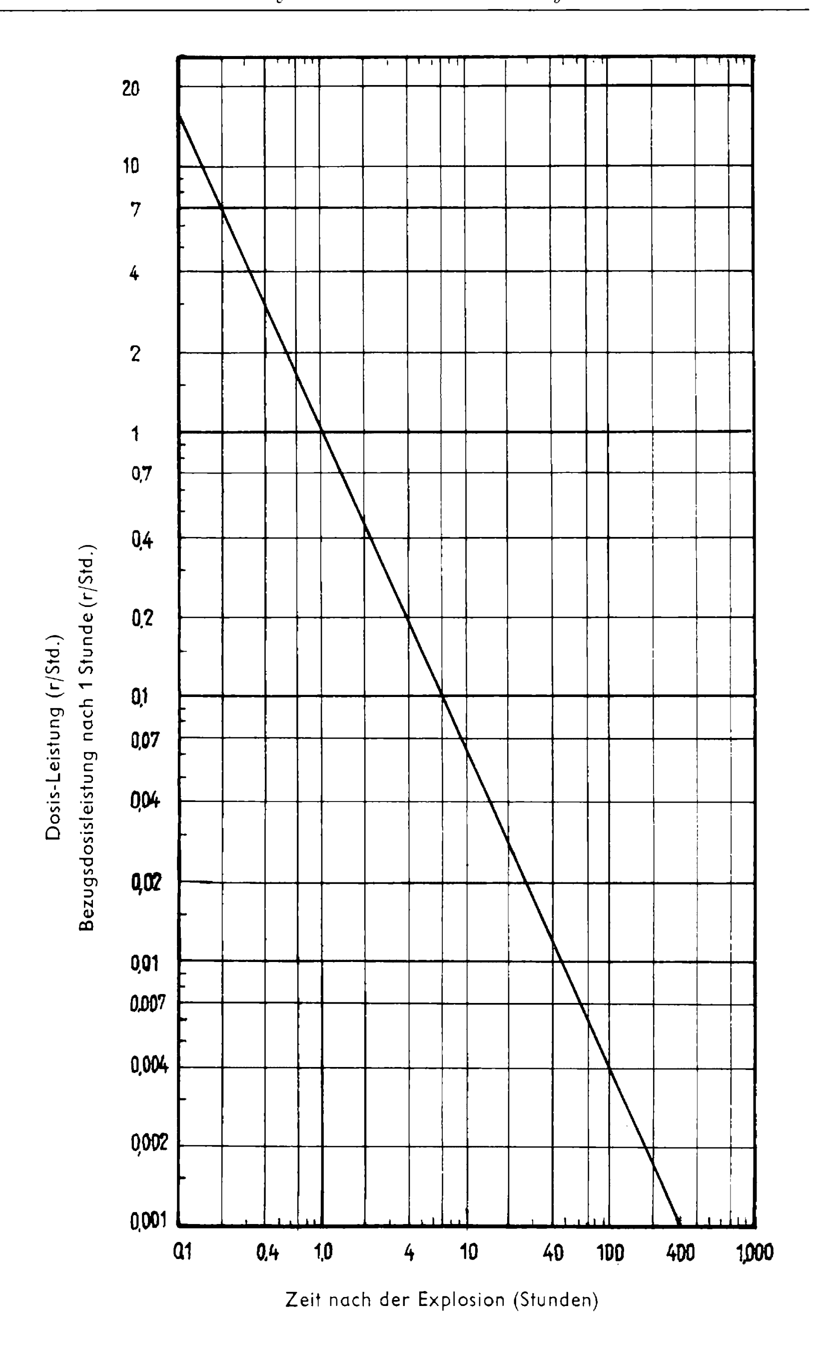


Bild 9.8 Absinken der Dosisleistung aus Spaltungsprodukten in Abhängigkeit von der Zeit

Spaltungsprodukte unter Umständen erst nach mehreren Stunden ankommen. Dennoch wird die für eine Stunde nach der Explosion angenommene (Bezugs-)Dosisleistung für Berechnungen noch immer herangezogen. Sie ist grundsätzlich die auf den Wert zurückbezogene Dosisleistung, den sie eine Stunde nach der Explosion gehabt hätte, falls das Abregnen von radioaktivem Niederschlag zu diesem Zeitpunkt völlig aufgehört hätte.

9.9 Nehmen wir z. B. an, daß der radioaktive Niederschlag an einer gegebenen Stelle 5 Stunden nach der Explosion beginnt, und daß nach 15 Stunden, wenn der radioaktive Niederschlag aufgehört hat, die beobachtete Dosisleistung 3,9 r pro Stunde beträgt. Aus der Kurve in Bild 9.8 (oder den Ergebnissen der Tabelle 9.11) ist leicht zu ermitteln, daß die angenommene (Bezugs-)Dosisleistung eine Stunde nach der Explosion 100 r pro Stunde betragen hat. Mittels dieses Vergleichswertes und der Zerfallskurve in Bild 9.8 kann die tatsächliche Dosisleistung an der fraglichen Stelle zu einer beliebigen Zeit nach Aufhören des radioaktiven Niederschlages festgestellt werden. Daher wird, falls man den Wert für 24 Stunden nach der Explosion sucht, in Bild 9.8 der Punkt auf der horizontalen Achse aufgesucht, der die 24. Stunde darstellt. Geht man bis zu der eingetragenen Linie aufwärts, dann findet man, daß die gesuchte Dosisleistung das 0,02fache des Bezugswertes von einer Stunde, d. h. $0{,}02 \times 100 = 2$ r pro Stunde beträgt.

9.10 Wenn die Dosisleistung zu einer bestimmten Zeit aus tatsächlich durchgeführten Messungen bekannt ist, kann die Dosisleistung zu anderen Zeiten errechnet werden. Hierzu braucht man nur die aus Bild 9.8 entnommenen Verhältniszahlen (zum Bezugswert der ersten Stunde) für die beiden gegebenen Zeitpunkte zu vergleichen. Nehmen wir z. B. an, daß die Dosisleistung 3 Stunden nach der Explosion mit 50 r pro Stunde festgestellt wurde; wie groß würde dann der Wert nach 18 Stunden sein? Unter Zugrundelegung der Bezugsdosisleistung nach einer Stunde sind die Verhältniszahlen nach der Kurve in Bild 9.8 0,27 bzw. 0,031. Somit beträgt die Dosisleistung 18 Stunden nach der Explosion $50 \times 0{,}031/0{,}27 = 5{,}7$ Röntgen pro Stunde.

9.11 Die Ergebnisse in Bild 9.8 können noch in einer anderen zweckmäßigeren, wenn auch etwas weniger erschöpfenden Form dargestellt werden, wie aus Tabelle 9.11 ersichtlich. Die Bezugsdosisleistung nach einer Stunde wird mit 1000 Einheiten angenommen. Die Dosisleistungen zu einer Reihe folgender Zeitpunkte sind in den gleichen Einheiten in der Tabelle wiedergegeben. Falls die tatsächliche Dosisleistung 1 Stunde (oder zu irgendeinem anderen Zeitpunkt) nach der Explosion bekannt ist, dann kann der Wert für jede beliebige Zeit, bis zu 1000 Stunden, durch einfache Proportion[1]) ermittelt werden.

9.12 Es ist zu beachten, daß Bild 9.8 und Tabelle 9.11 für die Errechnung der Dosis*leistungen* herangezogen werden. Um die tatsächliche oder gesamte aufgenommene Strahlendosis zu ermitteln, muß die durchschnittliche Dosisleistung mit der Zeit multipliziert werden, während der jemand der Strahlung ausgesetzt war

[1]) Es gibt verschiedene einfache Vorrichtungen, die einem Rechenschieber ähnlich sind, um die Dosisleistung des Zerfalls des radioaktiven Niederschlages und andere einschlägige Werte schnell errechnen zu können.

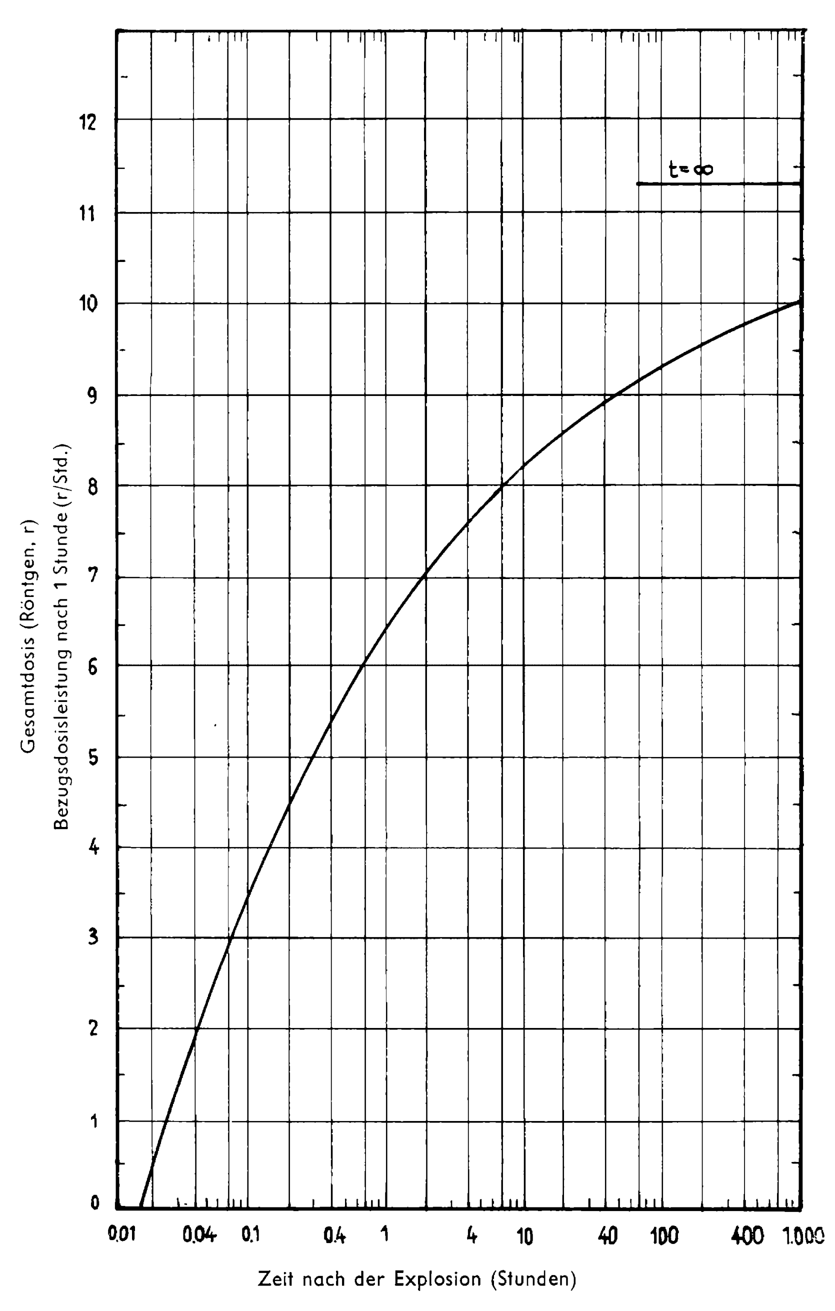


Bild 9.12 Akkumulierte Gesamtdosis, Rückstandsstrahlung aus Spaltungsprodukten ab 1 Minute nach der Explosion.

Tabelle 9.11 Die relativen Dosisleistungen zu verschiedenen Zeitpunkten nach einer Kernexplosion

Zeit (in Stunden)	relative Dosisleistung	Zeit (in Stunden)	relative Dosisleistung
1	1000	30	17
$1^1/_2$	610	40	12
2	440	60	7,3
3	270	100	4,0
5	150	200	1,7
7	97	400	0,75
10	63	600	0,46
15	39	800	0,33
20	27	1000	0,25

(Abschn. 8.24). Weil die Dosisleistung während der Bestrahlung aber laufend abnimmt, muß dies entsprechend berücksichtigt werden. Das wird am besten durch einen mathematischen Integrationsprozeß erreicht, indem man eine einfache Formel verwendet, die die Änderung der Dosisleistung in Abhängigkeit von der Zeit darstellt (Abschn. 9.112). Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Bild 9.12 durch die Kurve ausgedrückt. Diese Kurve zeigt die gesamte aus den Spaltungsprodukten aufgenommene Dosis, gerechnet von einer Minute nach der Explosion bis zu beliebigen anderen Zeiten, auf der Basis der 1-Std.-Bezugsdosisleistung.

9.13 Um die Anwendung des Bildes 9.12 zu veranschaulichen, nehmen wir an, daß jemand zwei Stunden nach einer Kernexplosion einer bestimmten Menge von Spaltungsprodukten ausgesetzt wird und daß die zu diesem Zeitpunkt gemessene Dosisleistung mit 1,5 Röntgen pro Stunde festgestellt wird. Wie groß ist dann die aufgenommene Gesamtdosis während der folgenden 12 Stunden, d. h. bis zum Ablauf von 14 Stunden nach der Explosion? Zunächst muß die angenommene Bezugsdosisleistung nach einer Stunde festgestellt werden. Aus Bild 9.8 ist zu ersehen:

$$\frac{\text{Dosisleistung 2 Stunden nach der Explosion}}{\text{Bezugsdosisleistung 1 Stunde nach der Explosion}} = 0{,}43$$

Da man weiß, daß die Dosisleistung zum Zeitpunkt $t = 2$ 1,5 Röntgen pro Stunde beträgt, ist der Bezugswert zum Zeitpunkt $t = 1$ $1{,}5/0{,}43 = 3{,}5$ Röntgen pro Stunde. Aus Bild 9.12 ersehen wir für $t = 2$ bzw. $t = 14$:

$$\frac{\text{Gesamtdosis bei } t = 2}{\text{Bezugsdosisleistung bei } t = 1} = 7{,}0$$

ferner:

$$\frac{\text{Gesamtdosis bei } t = 14}{\text{Bezugsdosisleistung bei } t = 1} = 8{,}4$$

Durch Subtrahieren ergibt sich dann:

$$\frac{\text{empfangene Dosis zwischen } t = 2 \text{ und } t = 14}{\text{Bezugsdosisleistung bei } t = 1} = 1{,}4$$

Die Bezugsdosisleistung bei $t = 1$ beträgt 3,5 Röntgen pro Stunde; also beträgt die in den 12 Stunden zwischen $t = 2$ und $t = 14$ empfangene Gesamtdosis $3{,}5 \times 1{,}4 = 4{,}9$ Röntgen.

9.14 Der aus einer gegebenen Menge Spaltungsprodukte aufgenommene Prozentsatz der »Unendlichkeits-(Rückstandsstrahlungs-)Dosis« ist bis zu verschiedenen Zeiten nach einer Kernexplosion in Tabelle 9.14 wiedergegeben. Unter der Unendlichkeitsdosis versteht man im wesentlichen die Dosis, die man aufnehmen würde, wenn man einer bestimmten Menge von Spaltungsprodukten viele Jahre hindurch ausgesetzt wäre. Diese Daten können herangezogen werden, um den Prozentsatz der Unendlichkeitsdosis zu bestimmen, die während einer bestimmten Zeit nach dem abgeschlossenen Ablagerungsprozeß der Spaltungsprodukte aus einer Kernexplosion aufgenommen wurde.

Tabelle 9.14 Prozentsatz der bis zu verschiedenen Zeiten nach der Explosion aufgenommenen Unendlichkeits-Rückstandsstrahlungsdosis

Zeit (in Stunden)	% der Unendlichkeitsdosis	Zeit (in Stunden)	% der Unendlichkeitsdosis
1	56	48	80
2	62	72	81
4	67	100	82
6	69	200	85
12	73	500	87
24	77	1000	89
36	79	2000	90

9.15 Falls also jemand einer bestimmten Menge von Spaltungsprodukten, z. B. aus radioaktivem Niederschlag, während eines Zeitraumes von $t = 2$ bis $t = 14$ ausgesetzt wird, dann erhält man den Prozentsatz der aufgenommenen Unendlichkeitsdosis durch Subtraktion der betreffenden Werte aus Tabelle 9.14, d. h. 74 (für $t = 14$) minus 62 (für $t = 2$) = 12% der Unendlichkeitsdosis. Der tatsächliche Wert der Unendlichkeitsdosis, von einer Minute nach der Explosion an gerechnet, ist das 11,3fache der Bezugsdosisleistung bei $t = 1$ (in Röntgen pro Stunde), wie in Bild 9.12 dargestellt. Wenn also diese Bezugsdosisleistung bekannt ist (oder errechnet werden kann), dann kann zur Errechnung der während eines beliebigen Zeitraumes aufgenommenen Dosis an Stelle von Bild 9.12 die Tabelle 9.14 verwendet werden.

9.16 Mit Hilfe der Bilder 9.8 und 9.12 (oder der gleichwertigen Tabellen 9.11 und 9.14) können viele verschiedene Arten von Berechnungen der Strahlungsdosisleistungen und der aus Spaltungsprodukten aufgenommenen Gesamtdosen durchgeführt werden. Aber diese Verfahren können mit Hilfe besonderer graphischer

Darstellungen, die auf diesen Zahlen aufgebaut sind (s. Bild 12.107 und 12.108), vereinfacht werden.

9.17 Es ist zu berücksichtigen, daß die o. a. Tabellen und Bilder sowie die Berechnungen der Strahlendosisleistungen und Dosen, bei denen diese Tabellen und Bilder verwendet werden, auf der Annahme beruhen, daß ein Mensch einer bestimmten Menge von Spaltungsprodukten ausgesetzt ist und dieser Menge eine Zeitlang ununterbrochen (ungeschützt) ausgesetzt bleibt. Im Falle eines tatsächlichen radioaktiven Niederschlags würden diese Voraussetzungen jedoch nicht gelten. Zunächst einmal verringert jeder Schutzraum, der die Strahlung abschwächt, die errechnete Dosisleistung (und Dosis). Außerdem werden im allgemeinen durch Einwirkung von Wind und Wetter die Teilchen des radioaktiven Niederschlages verstreut. Dadurch können an einem gegebenen Punkt die Menge der Spaltungsprodukte und damit auch die Strahlungsdosisleistung (und Dosis) geringer sein.

Die von Neutronen induzierte Aktivität

9.18 Die beim Spaltungsprozeß freigesetzten Neutronen, die aber mit der Fortsetzung der Spaltungskette nichts zu tun haben, werden schließlich von den Sprengkörpermaterialien, die sie passieren müssen, bevor sie entweichen können, sowie von dem in der Luft enthaltenen Stickstoff und Sauerstoff und verschiedenen in der Erdoberfläche vorhandenen Elementen eingefangen. Die Folge des Neutroneneinfangs ist, daß viele Substanzen radioaktiv werden. Infolgedessen strahlen sie über einen längeren Zeitraum nach der Explosion Betateilchen aus, die häufig von Gammastrahlen begleitet sind. Eine solche von Neutronen induzierte Aktivität ist deshalb ein Teil der Rückstandsstrahlung.

9.19 Die in Sprengkörpermaterialien induzierte Aktivität ist sehr unterschiedlich, weil sie stark von der Konstruktion oder den baulichen Merkmalen der Kernwaffe abhängt. Alle durch den Neutroneneinfang in den Sprengkörperresten erzeugten radioaktiven Isotope bleiben mit den Spaltungsprodukten verbunden. Obwohl sie eine gewisse Wirkung auf die gesamte beobachtete Zerfallsgeschwindigkeit haben, so daß die Strahlungsdosisleistungen und Dosen nicht mit Bild 9.8 und 9.12 übereinstimmen, sind die Abweichungen von der Grundkurve für Spaltung und Zerfall wahrscheinlich nicht nennenswert, außer – vielleicht – bald nach der Explosion.

9.20 Wenn die Neutronen von den in der Luft vorhandenen Sauerstoff- und Stickstoffkernen eingefangen werden, ist die daraus entstehende Aktivität, soweit sie die Rückstandsstrahlung betrifft, gering oder unbedeutend. Der Sauerstoff z. B. wirkt in geringem Umfang auf die schnellen Neutronen ein, aber das sich hierbei ergebende Stickstoffisotop hat eine Halbwertszeit von nur 7 Sekunden. Es zerfällt also innerhalb von 2 oder 3 Minuten nahezu völlig. Das radioaktive Produkt eines Neutroneneinfangs durch Stickstoff ist Kohlenstoff-14; es emittiert keine Gammastrahlen, sondern nur Betateilchen mit verhältnismäßig geringem Energiegehalt. Kernexplosionen können die ziemlich große Menge dieser bereits in der Natur vorhandenen

Isotope nicht merklich erhöhen; deshalb stellen die Strahlungen aus Kohlenstoff-14 keine beachtenswerte Gefahr dar.

9.21 Ein bedeutender Teil der Rückstandsstrahlung kann durch die Aktivität entstehen, die durch den Neutroneneinfang in gewissen in der Erde vorhandenen Elementen induziert wird. Das Element, das wahrscheinlich die größte Aufmerksamkeit verdient, ist das Natrium. Obgleich es in gewöhnlichen Böden nur in sehr geringem Umfang vorkommt, kann die Menge des durch den Neutroneneinfang gebildeten radioaktiven Natriums-24 ganz beträchtlich sein. Dieses Isotop hat eine Halbwertszeit von 14,8 Stunden und emittiert sowohl Betateilchen als auch, was wichtiger ist, Gammastrahlen von relativ hoher Energie[1]).

9.22 Eine weitere Quelle induzierter Aktivität ist Mangan, das, weil es ein für den Pflanzenwuchs wichtiges Element ist, in den meisten Böden, wenn auch nur in kleinen Mengen, gefunden wird. Durch den Neutroneneinfang bildet sich das Radioisotop Mangan-56, das eine Halbwertszeit von 2,6 Stunden hat. Es emittiert beim Zerfall außer Betateilchen noch verschiedene Gammastrahlen von hoher Energie. Da seine Halbwertszeit geringer als die von Natrium-24 ist, verliert Mangan-56 seine Aktivität schneller. Aber innerhalb von wenigen Stunden nach der Explosion kann das Mangan eine ernste Gefahr darstellen, die größer ist als die des Natriums.

9.23 Ein Hauptbestandteil des Bodens ist Silizium; der Neutroneneinfang führt zur Bildung von radioaktivem Silizium-31. Dieses Isotop, das eine Halbwertszeit von 2,6 Stunden hat, gibt Betateilchen ab, aber Gammastrahlen werden in nicht mehr als ungefähr 0,07% beim Zerfall ausgestrahlt. Wir werden später noch sehen, daß die Betateilchen allein nur unter ganz bestimmten Umständen eine schwere Strahlungsgefahr darstellen. Aluminium, ein anderer häufig vorkommender Bestandteil des Bodens, kann das Radioisotop Aluminium-28 bilden, das eine Halbwertszeit von nur 2,3 Minuten hat. Obwohl solche Isotope mit kurzer Halbwertszeit viel zu der hohen Anfangsstrahlung beitragen, bleibt doch im Verlauf einer Stunde nach der Kernexplosion sehr wenig davon übrig.

9.24 Wenn Neutronen im Wasser von Wasserstoffkernen eingefangen werden, entsteht das nicht-radioaktive (stabile) Isotop Deuterium, so daß sich dadurch keine Aktivität ergibt. Wie oben festgestellt, kann die im Sauerstoff induzierte Aktivität wegen der sehr kurzen Halbwertszeit des Produkts unbeachtet bleiben, aber im Wasser aufgelöste Substanzen, besonders Salz (Chlornatrium) aus dem Meere, können zu Quellen einer beträchtlichen induzierten Aktivität werden. Das Natrium erzeugt, wie schon erwähnt, Natrium-24, und Chlor erzeugt Chlor-38, das sowohl Betateilchen als auch Gammastrahlen mit hohem Energieinhalt emittiert. Aber die Halbwertszeit von Chlor-38 beträgt nur 37 Minuten, so daß seine Aktivität innerhalb von 4–5 Stunden auf ungefähr 1% seines Anfangswertes absinkt.

9.25 Abgesehen von der Wechselwirkung zwischen Neutronen und den im Erdboden und im Wasser vorhandenen Elementen können die Neutronen aus einer Kern-

[1]) Bei jedem Zerfallsprozeß von Natrium-24 werden 2 Gammastrahlenphotonen mit Energien von 1,4 bzw. 2,8 MeV erzeugt. Die mittlere Energie je Photon aus Spaltungsprodukten beträgt 0,7 MeV, obgleich zu Anfang Gammastrahlen höherer Energie emittiert werden.

explosion von anderen Kernen eingefangen werden, z. B. von den in Baustoffen und anderem Material enthaltenen. Unter den Metallen sind die Hauptquellen induzierter Radioaktivität wahrscheinlich Zink, Kupfer und Mangan; das letztere ist ein Bestandteil vieler Stahlsorten und – in geringerem Umfang – von Eisen. Holz und Kleidung entwickeln wahrscheinlich keine nennenswerte Aktivität durch Neutroneneinfang, aber Glas könnte wegen seines hohen Natrium- und Siliziumgehalts radioaktiv werden. Bei Lebensmitteln kann induzierte Aktivität auftreten, und zwar in der Hauptsache auf Grund des Neutroneneinfangs durch Natrium. Aber bei Entfernungen von einer Kernexplosion und unter Bedingungen, die diese Aktivität bedeutsam machen würden, kämen die Lebensmittel aus anderen Gründen nicht mehr für den Genuß in Frage, z. B. wegen der Luftdruck- oder Brandschäden. Manche Elemente, z. B. Bor, absorbieren Neutronen, ohne radioaktiv zu werden, und ihr Vorhandensein bewirkt eine Verringerung der induzierten Aktivität.

Uran und Plutonium

9.26 Das der Spaltung in dem Atomsprengkörper entgangene Uran und Plutonium stellt eine weitere mögliche Quelle von Rückstandsstrahlungen dar. Die spaltbaren Isotope dieser Elemente emittieren Alphateilchen sowie einige Gammastrahlen mit geringem Energieinhalt. Aber diese Aktivität ist auf Grund ihrer im Vergleich zu den Spaltungsprodukten sehr langen Halbwertszeit sehr gering.

9.27 Weiter unten (Abschn. 9.30) sehen wir, daß die von Uran und Plutonium oder von sonstigen radioaktiven Quellen stammenden Alphateilchen in 2,5–5 cm Luft völlig absorbiert werden. Dies sowie die Tatsache, daß die Teilchen gewöhnliche Kleidung nicht durchdringen können, deuten darauf hin, daß auf der Erde abgelagertes Uran und Plutonium keine große äußere Gefahr darstellen. Selbst wenn sie tatsächlich mit dem Körper in Berührung kommen, sind die ausgestrahlten Alphateilchen nicht fähig, heile Haut zu durchdringen.

9.28 Obgleich die Gefahr, die Uran und Plutonium außerhalb des Körpers darstellen, unbedeutend ist, könnte die Situation anders sein, wenn eines dieser Elemente durch die Lunge, die Verdauungsorgane oder Hautverletzungen in den Körper gerät. Plutonium z. B. neigt dazu, sich in den Knochen anzusammeln, wo eine längere Einwirkung der Alphateilchen zu schweren Schäden führen kann.

9.29 Früher wurde angenommen, daß die Explosion einer hinreichend großen Zahl von Plutoniumsprengkörpern zu einer derart ausgedehnten Verbreitung tödlich wirkender Stoffe führen kann, daß daraus eine Gefahr für die ganze Welt entstehen würde. Berechnungen haben ergeben, daß man hierzu die ungeheure Menge von über 500 t Plutonium benötigen würde. Jetzt hat man festgestellt, daß die Spaltungsprodukte, besonders das Radioisotop Strontium-90, eine größere Gefahr darstellen als Plutonium. Außerdem werden alle Maßnahmen zur Verringerung der Gefahr aus Spaltungsprodukten, die übrigens viel leichter nachzuweisen sind, sich automatisch auch auf Plutonium erstrecken. Einige Angaben über das Verhalten dieses Elementes im menschlichen Körper sind in Kapitel XI enthalten.

Die Schwächung der Rückstandsstrahlung

Alpha- und Betateilchen

9.30 Wenn Alphateilchen einen Stoff passieren, erzeugen sie eine beträchtliche direkte Ionisierung; dadurch verlieren sie ihre Energie schnell. Nachdem ein Alphateilchen eine bestimmte Entfernung zurückgelegt hat, die man »Reichweite« nennt, hört es auf, als solches zu existieren[1]). Die Reichweite eines Alphateilchens hängt von seiner Anfangsenergie ab, aber selbst die Plutoniumteilchen, die eine ziemlich hohe Energie aufweisen, haben in der Luft nur eine durchschnittliche Reichweite von etwa 3,8 cm. In dichteren Medien, z. B. in Wasser oder im Zellgewebe, ist diese Reichweite sogar noch geringer; sie beträgt dann ungefähr ein Tausendstel der in der Luft vorhandenen Reichweite. Deshalb sind die aus radioaktiven Quellen stammenden Alphateilchen zu einer Durchdringung auch nur der äußeren Hautschicht (Epidermis) nicht imstande. Man kann daran ermessen, daß, soweit es sich um Alphateilchen handelt, welche aus Quellen außerhalb des Körpers stammen, die Abschwächung kein Problem darstellt.

9.31 Betateilchen können ebenso wie Alphateilchen bei ihrem Passieren von Stoffen eine direkte Ionisierung verursachen. Aber die Betateilchen verbrauchen ihre Energie weniger schnell und haben dadurch in der Luft und in anderen Stoffen eine größere Reichweite. Viele der durch Spaltungsprodukte ausgestrahlten Betateilchen legen in der Luft eine Entfernung von insgesamt 3 m oder mehr zurück, bevor sie absorbiert werden. Aber da die Teilchen durch Elektronen und Kerne des Stoffs dauernd abgelenkt werden, ist ihre Bahn sehr unregelmäßig, und deshalb ist ihre tatsächliche (oder Netto-)Reichweite etwas kürzer.

9.32 Die Reichweite eines Betateilchens ist in dichteren Medien kürzer, und die durchschnittliche Nettoentfernung, die ein Teilchen von bestimmtem Energieinhalt im Wasser, Holz oder Zellgewebe zurücklegen kann, beträgt ungefähr ein Tausendstel der Entfernung in der Luft. Auf diese Weise würden Menschen im Inneren eines Hauses vor Betateilchen, die aus Spaltungsprodukten außerhalb des Hauses stammen, geschützt sein. Es hat den Anschein, daß selbst einfache Kleidung schon zu einer wesentlichen Schwächung der Betastrahlung führt; dabei schwankt der genaue Grad mit dem Gewicht und der Zahl der Bekleidungsschichten.

Die Gammastrahlen

9.33 Bei den Gammastrahlen der Rückstandsstrahlung verhält es sich anders. Diese Gammastrahlen können ebenso wie diejenigen, die ein Teil der Anfangsstrahlung sind, in der Luft beträchtliche Entfernungen zurücklegen und in den Körper

---

[1]) Ein Alphateilchen ist identisch mit einem Kern des Elements Helium (Abschn. 1.51). Wenn es den größten Teil seiner (kinetischen) Energie verloren hat, fängt es zwei Elektronen ein und wird zu einem harmlosen (neutralen) Heliumatom.

eindringen. Wenn die Schäden auf ein Mindestmaß begrenzt werden sollen, dann müssen bestimmte Maßnahmen getroffen werden, um die Gammastrahlen aus äußeren Quellen abzuschwächen. Übrigens führt jede Methode, die zur Verringerung von Gammastrahlen angewendet wird, außerdem noch zu einer viel stärkeren Schwächung von Alpha- und Betateilchen.

9.34 Die Absorption von Gammastrahlen der Rückstandsstrahlung, die aus Spaltungsprodukten und aus den durch Neutroneneinfang, z. B. von Natrium und Mangan erzeugten Radioisotopen herrühren, beruht auf genau den gleichen Grundbegriffen, wie sie in Kapitel VIII im Zusammenhang mit der Anfangsgammastrahlung beschrieben sind. Aber von den frühen Zerfallsstadien abgesehen, haben die Gammastrahlen aus Spaltungsprodukten durchschnittlich einen viel geringeren Energieinhalt als diejenigen, die in der ersten Minute nach einer Kernexplosion ausgestrahlt werden[1]). Das bedeutet, daß die Gammastrahlen der Rückstandsstrahlung leichter geschwächt werden, oder daß im Vergleich zur Anfangsgammastrahlung eine geringere Dicke eines gegebenen Materials den gleichen Schwächungsgrad bewirkt.

9.35 Die ungefähre Halbwertsdicke einiger häufig vorkommender Stoffe ist in Tabelle 9.35 für die Gammastrahlen aus Spaltungsprodukten wiedergegeben; dabei muß man allerdings die in Abschn. 8.43 dargelegten Einschränkungen berücksichtigen. Wenn man diese Dicken mit den in Tabelle 8.44 für die Anfangsgammastrahlung angegebenen vergleicht, stellt man fest, daß die Rückstandsstrahlung leichter abgeschwächt wird. Der Grad der Wirksamkeit verschiedener Stoffe ist jedoch in beiden Fällen gleich, weil er weitgehend (wenn auch nicht ganz) von der Dichte bestimmt wird. Die Zahlen in der letzten Spalte von Tabelle 9.35 zeigen, daß das Produkt aus der Halbwertsdicke und der Dichte des Materials in allen aufgeführten Fällen ungefähr gleich ist (Abschn. 8.45).

Tabelle 9.35 Ungefähre Halbwertsdicke von Materialien für die Gammastrahlen aus Spaltungsprodukten

Material	Dichte kg/m³	Halbwertsdicke cm	Produkt
Stahl	7850	1,8	14100
Beton	2300	5,6	12900
Erde	1600	8,4	13450
Wasser	1000	12,2	12200
Holz	545	22,4	12200

9.36 Die Schwächungsfaktoren für Stahl, Beton, Erde und Holz, wie sie in Abschnitt 8.46 für eine Reihe von Dicken dieser Stoffe aufgeführt sind, sind analog zu Bild 8.47 in Bild 9.36 für die Anfangsgammastrahlung graphisch dargestellt. Daraus geht hervor, daß die Schwächung der Rückstandsstrahlung um einen Faktor von

[1]) Die durchschnittliche Energie von Gammastrahlen aus Spaltungsprodukten beträgt, von den frühen Zerfallsstadien abgesehen, ungefähr 0,7 MeV pro Photon. Das kann mit einem effektiven Wert von ungefähr 4,5 MeV für die Anfangsgammastrahlung verglichen werden (Abschn. 8.92).

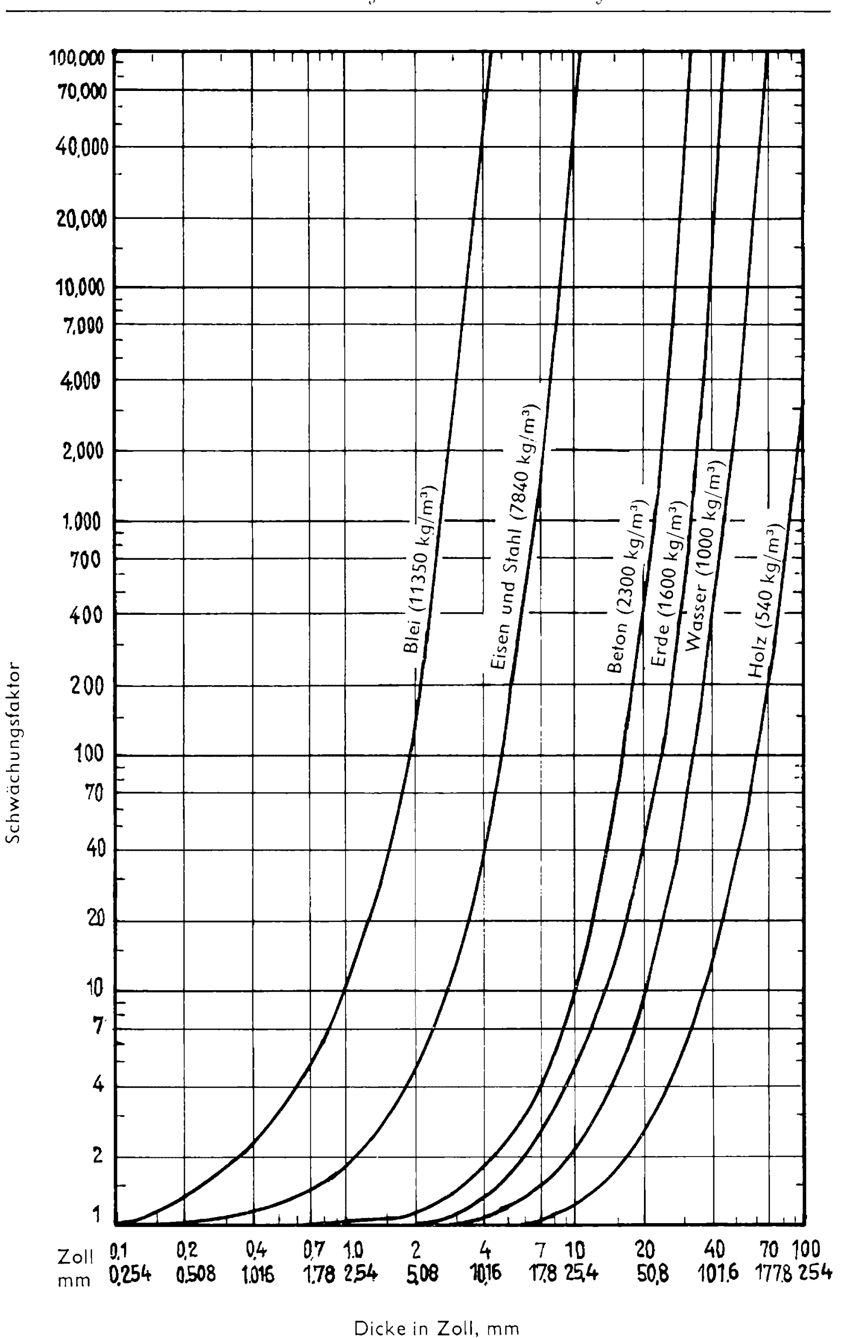


Bild 9.36 Schwächung der Strahlung aus Spaltungsprodukten

50 eine Betondicke von 38 cm erfordert. Im Vergleich hierzu werden zur Erzielung des gleichen Schwächungsgrades bei Anfangsgammastrahlen nach Abschn. 8.47 74 cm Beton benötigt.

9.37 Für die Praxis ist es von Interesse, die Schwächungsfaktoren aufzuführen, die innerhalb verschiedener Bauten erwartet werden können. Für diese Schwächung sind zwei Faktoren verantwortlich: 1. die Wirkung des Abstandes, denn die Strahlenquelle ist meist draußen, z. B. auf dem Dach oder auf der Straße, 2. die teilweise Absorption von Strahlen durch das Dach und die Wände. Die angenäherten Werte in Tabelle 9.37 sind teils durch Berechnungen, teils durch Messungen ermittelt worden. Es ist festgestellt worden, daß im Keller eines Fachwerkhauses die Gammastrahlen der Rückstandsstrahlung auf etwa $^1/_{10}$ ihres außerhalb des Hauses gemessenen Wertes reduziert werden. Eine etwa 90 cm hohe Erdschicht schwächt die Strahlen auf $^1/_{1000}$ (oder weniger) der Intensität ab, die sie andernfalls an der gleichen Stelle haben würde.

Tabelle 9.37 Die errechneten Schwächungsfaktoren für die Gammastrahlen der Rückstandsstrahlung in Gebäuden

Art des Bauwerks	angenäherter Schwächungsfaktor
Fachwerkhaus:	
Erdgeschoß	2
Keller	10
Mehrstöckiges Gebäude aus Stahlbeton:	
untere Stockwerke (in einiger Entfernung von den Fenstern)	10
Keller (von Erde umgeben)	1000[1])
Schutzräume unter Erdgleiche:	
90 cm Erde	1000[1])

Beurteilungsgrundlagen der Bestrahlung

Akute und chronische Bestrahlung

9.38 Wenn man die schädigende Wirkung von Gammastrahlen aus äußeren Quellen auf den Körper betrachtet, dann muß man zwischen »akuter« (schlagartiger) und »chronischer« (andauernder) Bestrahlung unterscheiden. Bei der akuten Bestrahlung wird die ganze Strahlendosis in einem verhältnismäßig kurzen Zeitraum aufgenommen. Das ist z. B. bei der im vorhergehenden Kapitel behandelten Anfangs-

[1]) oder darüber.

strahlung der Fall. Es ist nicht möglich, die akute Dosis genau zu definieren, aber man kann sie ungefähr als die Dosis betrachten, die während eines Zeitraums von 24 Stunden aufgenommen wird. Die langzeitigen Strahlungen aus Spaltungsprodukten halten jedoch länger an; in diesem Falle handelt es sich um eine chronische Bestrahlung.

9.39 Daß es wichtig ist, eine Unterscheidung zwischen akuter und chronischer Bestrahlung zu machen, liegt in der Tatsache, daß der Körper sich von einigen Folgen der Kernstrahlung – sofern die Dosis nicht zu groß ist – schon teilweise erholt, während er ihr noch immer ausgesetzt ist. Um einen gewissen Schadensgrad zu verursachen, würde – von bestimmten, oben bereits erwähnten Wirkungen abgesehen – also eine größere Gesamt-Gammastrahlendosis nötig sein, wenn diese sich auf mehrere Tage verteilt, als wenn die gleiche Dosis innerhalb etwa einer Minute aufgenommen wird.

9.40 In Abschn. 8.26 wurde festgestellt, daß eine akute Gammastrahlendosis von 450 Röntgen, die den ganzen Körper trifft, wahrscheinlich in ungefähr 50% der Fälle zum Tode führt. Wird die gleiche Anzahl Röntgen in einem Zeitraum von ein paar Wochen aufgenommen, dann ist die Wahrscheinlichkeit, daß der Tod eintritt, geringer. Auf Grund der vielen hierbei in Frage kommenden Faktoren kann zur Zeit der genaue Grad der Erholung, der im Verlauf einer dauernden Bestrahlung zu erwarten wäre, nicht festgestellt werden. Einige Wirkungen, z. B. die genetischen Veränderungen, scheinen zu keiner Wiederherstellung zu führen (s. Abschn. 11.124). Soweit es sich aber um die mehr augenfälligen Schäden handelt, kann man mit Sicherheit nur sagen, daß eine gegebene Dosis, die sich über einen Zeitraum von etwa 2 Wochen oder mehr verteilt, weniger schädlich wäre als eine akute Dosis mit der gleichen Zahl von Röntgen (oder rem), die innerhalb 24 Stunden empfangen würde.

Die natürliche Umweltstrahlung

9.41 Im Zusammenhang mit der chronischen Strahlendosis darf darauf hingewiesen werden, daß das menschliche Leben sich einer gewissen Strahlenmenge, die über einen langen Zeitraum dauernd aufgenommen wird, angepaßt hat. Diese Feststellung fußt auf der Tatsache, daß alle Lebewesen ständig Strahlen aus verschiedenen natürlichen Quellen sowohl innerhalb als auch außerhalb des Körpers ausgesetzt sind. Die wichtigste innere Strahlenquelle ist das Radioisotop Kalium-40; es ist ein Bestandteil des in der Natur vorkommenden Elements Kalium. Kohlenstoff-14 im Körper ist ebenfalls radioaktiv, aber es ist nur eine kleine Quelle für die interne Bestrahlung. Auch im Boden und im Gestein kommen in unterschiedlichen Mengen sowohl etwas Kalium-40 als auch radioaktives Uran, Thorium und Radium vor. Schließlich stellen eine bedeutende Quelle für in der Natur vorkommende Kernstrahlen die sog. »kosmischen Strahlen«, die aus dem Weltraum kommen, dar. Die aus dieser Strahlung aufgenommene Dosis nimmt mit der Höhe zu; bei 4600 m beträgt sie mehr als das 5fache der Intensität in Meereshöhe.

9.42 Eine Schätzung der gesamten Strahlendosis aus natürlichen Quellen, der der Mensch pro Jahr über den ganzen Körper ausgesetzt ist, ist in Tabelle 9.42 wiedergegeben. Es wird angenommen, daß der Untergrund Granit ist; die Meßwerte sind für Meereshöhe und für eine Höhe von 1,5 km angegeben. An manchen Orten ist die Umweltstrahlungsdosis aus dem Erdboden und dem Untergrund geringer als die aus Granit, aber in den Vereinigten Staaten beträgt die natürliche Strahlungsdosis wohl größtenteils etwa 0,14–0,16 r pro Jahr.

Tabelle 9.42 Geschätzte jährliche Dosis der natürlichen Umweltstrahlung

Strahlenquelle	Röntgen pro Jahr Meeresspiegel	Röntgen pro Jahr 1,5 km Höhe
Kalium im Körper	0,020	0,020
Thorium, Uran und Radium in Granit	0,055	0,055
Kalium in Granit	0,035	0,035
Kosmische Strahlen	0,035	0,035
insgesamt	0,145	0,160

9.43 Daraus folgt, daß jeder Mensch bei durchschnittlicher Lebensdauer mit dem ganzen Körper einer Kernstrahlung aus natürlichen Quellen von insgesamt 10–12 r ausgesetzt ist. Überdies können noch örtlich begrenzte Bestrahlungen vorkommen, z. B. bei Röntgenbestrahlung (Durchleuchtungen) von Zähnen und Brustkorb und ähnlichen Behandlungen und sogar von den leuchtenden Zifferblättern von Armbanduhren und Instrumenten. Die Bestrahlung aus natürlichen Quellen hält zweifellos während des ganzen Daseins des Menschen an.

Die höchstzulässige Bestrahlung

9.44 Es ist erwiesen, daß Menschen dauernd Kernstrahlen ausgesetzt waren (und immer sind), die sowohl aus inneren als äußeren Quellen kommen. Die Folge davon war, daß ein stetiger biologischer (oder Gleichgewichts-)Zustand erreicht wurde. Diese Tatsache legt nahe, daß – von genetischen Wirkungen abgesehen – der Körper die Kraft hat, sich von einer gewissen andauernden Strahlendosis, die sich über den ganzen Körper verteilt, zu erholen. Man weiß nicht genau, wie groß diese andauernde Dosis ist. Auf jeden Fall dürfte sie bei den einzelnen Menschen verschieden sein.

9.45 Trotz der Ungewißheit in bezug auf das, was man die zulässige Dosis nennen könnte, ist man auf Grund von Angaben, die man durch Radiologen und Röntgentechniker, durch Beobachtung von durch Radium hervorgerufenen biologischen Schäden und durch Tierversuche erhalten hat, zu einigen Folgerungen gelangt. Diese Folgerungen müssen unter Umständen von Zeit zu Zeit überprüft werden, sobald weitere Daten über die Wirkungen verschiedener Kernstrahlungen auf den lebenden Organismus zur Verfügung stehen.

9.46 Dadurch, daß Kernenergie sowohl für friedliche als auch für militärische Zwecke erschlossen wird, sind jetzt viele Menschen über die Umweltstrahlung hinaus zusätzlich Kernstrahlen während ihrer Arbeitsstunden ausgesetzt. Um die Gesundheit von berufsmäßig der Strahlung ausgesetzten Erwachsenen zu schützen, wurde in den Vereinigten Staaten eine höchstzulässige Dosis von 0,3 r pro Woche festgesetzt. Es wird also zur Zeit angenommen, daß Personen, die in der Atomindustrie beschäftigt sind, pro Woche 0,3 r, d. h. pro Jahr 15 r, mit dem ganzen Körper über einen Zeitraum von vielen Jahren ausgesetzt sein können[1]).

9.47 Der Zweck der vorhergehenden Ausführungen ist, darauf hinzuweisen, daß die Kernstrahlung für die Menschen keinesfalls eine neue Erkenntnis ist. Außerdem scheint festzustehen, daß der Körper die Kraft hat, sich von gewissen Wirkungen andauernder mittlerer Strahlendosen teilweise zu erholen. Man nimmt an, daß die empfohlene höchstzulässige chronische Dosis für Arbeitskräfte, die mit Kernenergieprojekten zu tun haben, einen Sicherheitsfaktor einschließt. Es gibt tatsächlich Beweise dafür, daß sich bei Personen, die viel größeren Dosen einer Kernstrahlung ausgesetzt waren, keine erkennbaren Anzeichen für einen dauernden Schaden fanden. Dennoch darf man nicht vergessen, daß ausreichend große chronische oder akute Strahlendosen zu schweren Schäden und sogar zum Tode führen können (s. Kap. XI).

Die radioaktive Verstrahlung bei Kernexplosionen

Die Verstrahlung bei einer Luftexplosion

9.48 Nach einer Kernexplosion kann die Erdoberfläche im wesentlichen auf zweierlei Weise mit radioaktiven Stoffen verstrahlt werden: einmal durch die induzierte Radioaktivität, nachdem verschiedene in der Erde (oder im Meer) vorhandene Elemente Neutronen eingefangen haben; zum anderen durch den radioaktiven Niederschlag, d. h. durch das Herabfallen radioaktiver Teilchen aus der bei der Explosion gebildeten Säule und Wolke (Abschn. 2.21). Sowohl die relative als auch die tatsächliche Bedeutung dieser beiden Verstrahlungsquellen hängen sehr weitgehend von der Lage des Explosionspunktes zur Erdoberfläche und außerdem von dem Explosionswert ab. Zu den anderen Faktoren, die unter Umständen Einfluß auf die Verstrahlung haben, gehören die Geländeform und die Wetterverhältnisse.

[1]) In den Empfehlungen des nationalen Ausschusses für Strahlenschutz und Strahlenmessung, die in einer Ausarbeitung über »Die für den Menschen höchstzulässige Strahlungsdosis« in »Radiology«, 68, 260 (1957) erschienen sind, ist ausgeführt, daß »die höchstzulässige akkumulierte Dosis in rem für jedes Alter das Fünffache der Zahl von Jahren beträgt, die über das 18. Lebensjahr hinausgehen, vorausgesetzt, daß die jährliche Steigerung 15 rem nicht übersteigt«, und daß »die höchstzulässige Dosis für die Geschlechtsdrüsen der Menschen in den Vereinigten Staaten aus sämtlichen Strahlenquellen einschließlich der medizinischen und anderen vom Menschen hergestellten Quellen sowie der Umweltstrahlen nicht größer sein soll als 14 Millionen rem pro Million der Bevölkerung während des Zeitraums von der Empfängnis bis zum 30. Lebensjahr; in jedem folgenden Jahrzehnt soll die Dosis ein Drittel der oben angegebenen Menge nicht übersteigen.«

9.49 Bei einer Luftexplosion kondensieren sich radioaktive Sprengkörperüberreste, die weitgehend aus Spaltungsprodukten bestehen, zu sehr kleinen, festen Teilchen. In diesem fein verteilten Zustand gerät ein Teil der radioaktiven Teilchen in die Stratosphäre, schwebt dort viele Jahre lang und umkreist die Erde sogar mehrmals, bevor er zur Erde niederfällt. Während dieses Zeitraums machen die radioaktiven Teilchen einen Zerfallsprozeß durch und verlieren dabei an Aktivität. Deshalb sind sie, wenn sie die Erde erreichen, weit verstreut worden, und ihre Radioaktivität hat bis dahin stark nachgelassen. Tatsächlich würde die äußere Strahlung aus dem radioaktiven Niederschlag eines Atomsprengkörpers, dessen Explosionswert im Megatonnenbereich liegt, im Vergleich zur natürlichen Umweltstrahlung außerordentlich gering sein (siehe jedoch Kap. X).

9.50 Unter gewissen meterologischen Bedingungen, z. B. bei außergewöhnlichen Winden oder Regenfällen, kann es auch zu einem stärkeren radioaktiven Niederschlag kommen, der aber wahrscheinlich mehr örtlichen Charakter hat; z. B. können sich bei feuchter Luft die feinen Teilchen von Sprengkörperüberresten an Wassertröpfchen hängen, die dann als radioaktiver Regen herunterkommen. Dies war offensichtlich bei der Luftexplosion in ziemlich geringer Höhe über dem Bikini-Atoll (ABLE-Test) im Jahr 1946 der Fall, wie in Abschn. 2.98 bereits dargelegt. Das Ausmaß der Aktivität war jedoch gering, weil sich der größte Teil der Spaltungsprodukte wahrscheinlich zu der Zeit über den Regenwolken befand.

9.51 Besonders interessant sind die Verhältnisse bei einer warmen Regenfront, wie sie häufig in gemäßigten Breitengraden vorkommt. Die Regenwolken können rund 6 km dick sein und sich über viele hundert Quadratkilometer erstrecken. Der Regen ist gewöhnlich sanft, fällt aber eine gewisse Zeit hindurch ununterbrochen. Falls diese Situation zur Zeit der Explosion gegeben ist, können die sich bei einer Luftexplosion bildenden radioaktiven Teilchen mit den Regenwolken aufsteigen. In kurzer Zeit würde sich die Atomwolke, falls sie sich nicht über die Regenwolke erhebt, so mit der letzteren vermischen, daß sie zu einem wesentlichen Bestandteil des regenerzeugenden Systems wird. Dann kann man damit rechnen, daß der radioaktive Stoff mit dem Regen über einem großen Gebiet niedergeht und auf dem Erdboden eine Fläche bedeckt, die von den in dieser Wolkenhöhe herrschenden Winden abhängt.

9.52 Bei Luftexplosion eines Atomsprengkörpers mit geringem Explosionswert tritt – von ungewöhnlichen Umständen abgesehen – kein stärkerer örtlicher radioaktiver Niederschlag auf; diese Annahme wird durch die Tatsache erhärtet, daß es bei den Kernwaffenangriffen auf Japan keine Verluste gab, die auf die Rückstandsstrahlung zurückzuführen wären. Ungefähr 0,02% der Spaltungsprodukte lagerten sich in Nagasaki auf der Erdoberfläche in einem Gebiet um den Nullpunkt ab, dessen Radius rund 600 m betrug. Dennoch bestand zu keiner Zeit eine größere Strahlengefahr. Bei Versuchen gemachte Beobachtungen deuten darauf hin, daß der örtliche radioaktive Niederschlag bei Luftexplosionen auch bei Atomsprengkörpern hohen Explosionswertes gering ist.

9.53 Eine bedeutende Verstrahlungsquelle auf Grund von Rückstandsstrahlung aus einer Luftexplosion kann die Aktivität sein, die (Abschn. 9.21 ff) durch Neutronen-

einfang von Elementen auf der Erdoberfläche, besonders von Natrium und Mangan, induziert wird. Der Grad der Verstrahlung, der nur in einem begrenzten Gebiet um den Nullpunkt herum beträchtlich sein dürfte, hängt von der Höhe der Explosion, dem Explosionswert und der Zeit ab, die seit der Explosion vergangen ist. Man nimmt an, daß z. B. in Hiroshima und Nagasaki die induzierte Radioaktivität auf der Erdoberfläche unbedeutend war. Beim ABLE-Test auf Bikini jedoch, wo die Explosion in geringerer Höhe als bei den japanischen Explosionen erfolgte, bildete sich im Wasser eine beträchtliche Menge von radioaktivem Natrium-24. Die Gammastrahlen aus diesem Isotop ergaben zwei Stunden nach der Explosion genau über der Oberfläche der Lagune eine Dosisleistung von ungefähr 1 r pro Stunde.

9.54 Wenn eine Kernwaffe mit hohem Explosionswert in geringer Höhe in der Luft explodiert, kann eine stärkere Verstrahlung durch die induzierte Aktivität in der Nähe des Nullpunktes entstehen. In diesem Gebiet würde – von starken Bauten unter der Erde abgesehen – die Zerstörung durch Luftdruck und Feuer praktisch hundertprozentig sein.

Die Verstrahlung bei einer Bodenexplosion

9.55 Bei einer Luftexplosion kann die durch Neutronen induzierte Aktivität bedeutend sein, jedoch ist der örtliche radioaktive Niederschlag kurz nach der Explosion im allgemeinen unbedeutend. Aber die Spaltungsprodukte werden zur Aktivität des sich nach und nach über ausgedehnte Gebiete niedersenkenden radioaktiven Niederschlags beitragen. Bei einer Boden- oder Untererdexplosion wird der örtliche radioaktive Niederschlag von größerer Bedeutung sein. Obwohl es zweifellos in der Nähe des Nullpunktes zu einer beträchtlichen Menge induzierter Radioaktivität kommen wird, ist bei einer Bodenexplosion die Aktivität des Niederschlags der Spaltungsprodukte so viel stärker, daß die induzierte Aktivität im Vergleich dazu unbeachtet bleiben kann. Infolgedessen befaßt sich die folgende Erörterung der Rückstandsstrahlung nach einer Bodenexplosion in der Hauptsache mit dem (örtlichen) radioaktiven Niederschlag der Spaltungsprodukte.

9.56 Der Anteil der im radioaktiven Niederschlag in Erscheinung tretenden Aktivität an der gesamten Radioaktivität der Sprengkörperüberreste hängt davon ab, wie weit der Feuerball die Erdoberfläche berührt.

Deshalb ist der Anteil der vorhandenen Aktivität um so größer, je niedriger die Explosion ist und je mehr Berührung der Feuerball mit der Erde hat. Bei einer Bodenexplosion, d. h. wenn der Sprengkörper bei seiner Explosion die Erdoberfläche berührt, werden ungefähr 50% der gesamten Rückstandsradioaktivität sich auf der Erde über einige hundert Kilometer vom Explosionspunkt ablagern. Die restliche Aktivität wird lange Zeit in der Luft schweben und schließlich – wie bei einer Luftexplosion – viele Hunderte oder Tausende von Kilometern weg den Erdboden erreichen (Abschn. 9.49).

9.57 Bei einer Bodenexplosion werden große Mengen Erde, Staub und Schutt in den Feuerball, der sich noch in seinen Anfangsstadien befindet, hochgerissen. Hier

schmelzen oder verdampfen sie und vermischen sich eng mit den Spaltungsprodukten und anderen Sprengkörperüberresten, wie in Abschn. 2.21 beschrieben. Dadurch bildet sich beim Abkühlen eine ungeheuere Zahl kleiner Teilchen, die bis zu einer gewissen Tiefe mit radioaktiven Stoffen verstrahlt sind. Überdies entstehen große Mengen von Teilen und Teilchen, die von großen Brocken bis zu feinem Staub reichen und an deren Oberfläche Spaltungsprodukte sich mehr oder weniger fest anhängen.

9.58 Die größeren (schwereren) Stücke, zu denen eine ganze Menge des aus dem Krater abgeschürften und hochgeworfenen verstrahlten Materials gehört (Abschnitt 5.4), werden nicht bis zur pilzförmigen Wolke hochgetragen, sondern fallen aus der Säule herunter. Sofern der Wind nicht übermäßig stark ist, wird sich dieses grobe Teilchenmaterial beim Herunterfallen auf eine annähernd kreisförmige Fläche um den Nullpunkt ablagern. In Wirklichkeit wird der Mittelpunkt dieser Kreisfläche, der »Nullpunktkreis«, vom Winde gewöhnlich etwas vom Nullpunkt fort verschoben.

9.59 Der größte Teil des oben erwähnten verstrahlten Materials, das den Nullpunktkreis bildet, fällt in kurzer Zeit nieder; der ganze Vorgang dauert nicht länger als eine Stunde. Die kleineren Teilchen in der atomaren Säule werden jedoch bis zu einer Höhe von mehreren Kilometern (Abschn. 2.16) getragen; unter Umständen verteilen sie sich in der pilzförmigen Wolke über einen gewissen Bereich, bevor sie herunterzukommen beginnen. Die Zeit, die sie brauchen, um die Erde zu erreichen, und die zurückgelegte horizontale Entfernung hängen von der vor dem Herabfallen erreichten Höhe, von der Teilchengröße und vom Windverlauf in der oberen Atmosphäre ab. Die kleinsten (und leichtesten) Teilchen, wie sie sich z. B. bei einer Luftexplosion bilden, geraten in die Stratosphäre und bleiben dort lange schwebend; sie bewegen sich unter Umständen viele tausend Kilometer fort, bevor sie heruntersinken (Abschn. 9.49). Aber der größte Teil der gröberen Teilchenmaterie wird wahrscheinlich als radioaktiver Niederschlag einige hundert Kilometer vom Nullpunkt entfernt die Erde erreichen.

9.60 In der Regel ist – abgesehen von den kleinsten Teilchen, die über einem ausgedehnten Gebiet herunterkommen – damit zu rechnen, daß der radioaktive Niederschlag von Teilchen mittleren und kleinen Formats im Lauf der Zeit eine verstrahlte Fläche bildet, die eine längliche (oder zigarrenartige) Form hat. Ihre Form und Ausmaße werden von den Windgeschwindigkeiten und -richtungen in allen Höhen zwischen dem Erdboden und der Atomwolke bestimmt. Der Einfachheit der Darstellung halber kann der wirkliche komplexe Windverlauf durch einen angenähert äquivalenten »effektiven Wind« ersetzt werden. Die Richtung und Geschwindigkeit dieses Windes sollen bewertete Durchschnitte eines ganzen Windsystems darstellen, dem die Teilchen ausgesetzt sind, wenn sie als örtlicher radioaktiver Niederschlag aus einer Atomwolke herabsinken (s. Abschn. 9.140).

9.61 In Bild 9.61 wird der Versuch gemacht, das verstrahlte Gebiet, zu dem es durch die Rückstandsstrahlung kommt, zu verallgemeinern. Bild 9.61 zeigt den Nullpunkt (GZ)-Kreis, der einer bestimmten Dosisleistung (oder Gesamtdosis) Kernstrahlung zu einer bestimmten Zeit entspricht. Sein Mittelpunkt wurde durch den

Wind in der Umgebung der Explosion vom tatsächlichen Nullpunkt etwas verschoben. Es wird angenommen, daß die Richtung dieses Windes die gleiche ist wie die des effektiven Windes beim radioaktiven Niederschlag, aber das ist nicht unbedingt immer der Fall. Das ganze verstrahlte Gebiet um den Nullpunkt besteht aus einer Reihe von Kreisen, von denen ein jeder eine Dosisleistungs-(oder Dosis-)Kontur bei einer bestimmten Dosisleistung (oder Dosis) Rückstandsstrahlung darstellt.

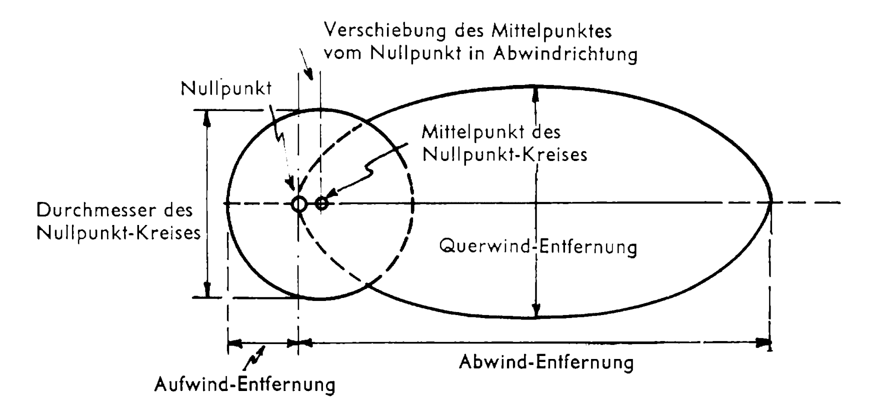


Bild 9.61 Verallgemeinertes Niederschlagsgebiet

9.62 Die Ellipse, deren lange Achse in Richtung des effektiven Windes verläuft, stellt eine vereinfachte Dosisleistungs-(oder Dosis-)Kontur für den radioaktiven Niederschlag dar. Auch hier kann das ganze verstrahlte Gebiet des radioaktiven Niederschlags durch eine Reihe derartiger Ellipsen dargestellt werden. Zu einem bestimmten Zeitpunkt nach der Explosion wird die Dosisleistung (oder Dosis) um so geringer, je größer der Abstand vom Nullpunkt wird, weil die Menge radioaktiven Niederschlags pro Flächeneinheit wahrscheinlich ebenfalls geringer ist. In manchen Fällen (s. Bild 9.63b) stellen die Konturen die aus dem radioaktiven Niederschlag bis zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgenommene Gesamtdosis dar. Zur Verringerung der Dosis mit zunehmender Entfernung von der Explosion trägt dann noch ein weiterer Faktor bei. Die späteren Ankunftszeiten des radioaktiven Niederschlags bei diesen größeren Entfernungen bedeuten, daß die Spaltungsprodukte in gewissem Umfang zerfallen sind, solange die Teilchen noch in der Luft schwebten. Zu der Zeit, da der radioaktive Niederschlag den Boden erreicht, ist die Aktivität einer gewissen Masse in größerer Entfernung vom Explosionspunkt also geringer als die einer gleichen Masse, die näher am Nullpunkt heruntergekommen ist.

9.63 Die Diagramme in Bild 9.63a und b zeigen, wie der radioaktive Niederschlag nach einer Bodenexplosion von hohem Explosionswert während eines Zeitraums von mehreren Stunden sich über ein großes Gebiet ausbreitet. Die Geschwindigkeit des effektiven Windes wurde mit 24 km in der Stunde angenommen. Bild 9.63a zeigt

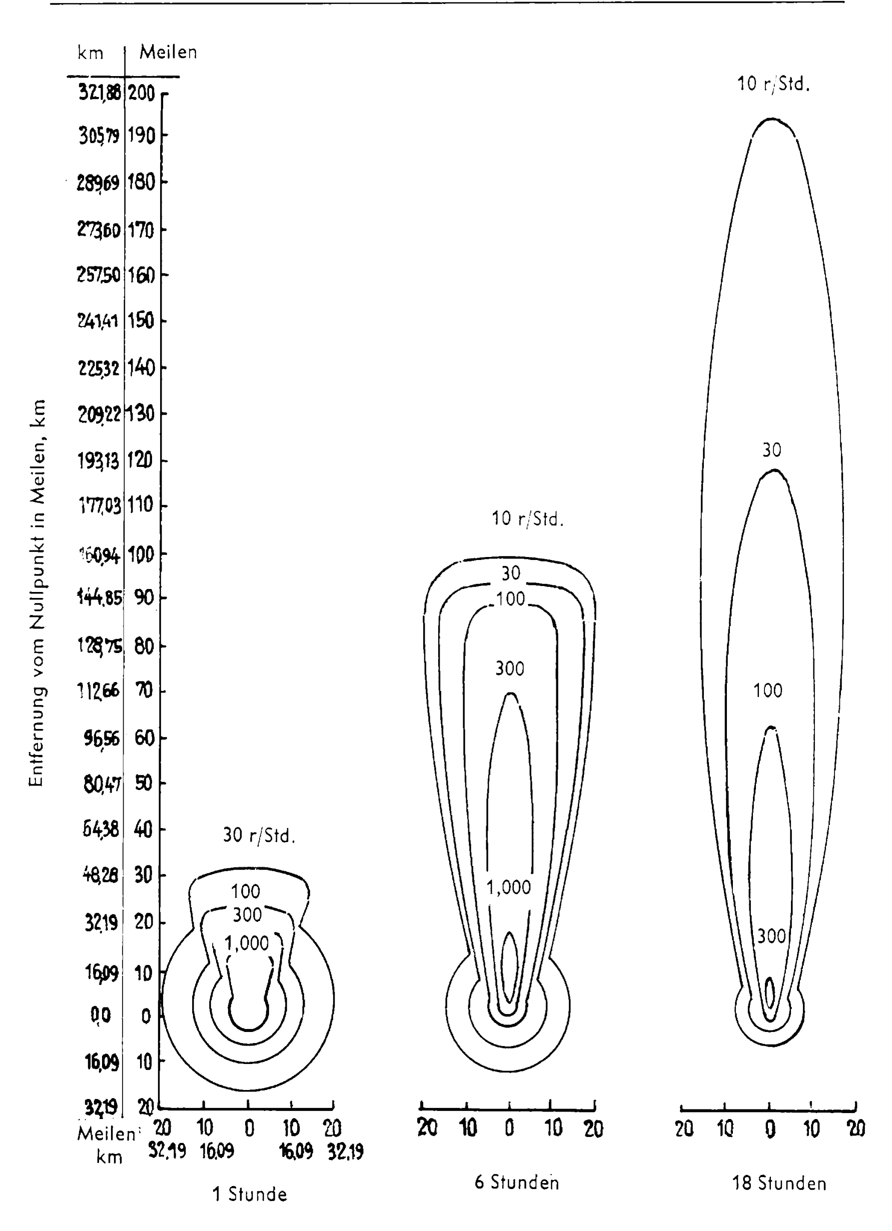


Bild 9.63a Konturen der Dosisleistung aus radioaktivem Niederschlag 1, 6 und 18 Stunden nach Bodenexplosion im Megatonnenbereich (24 km/h effektive Windgeschwindigkeit)

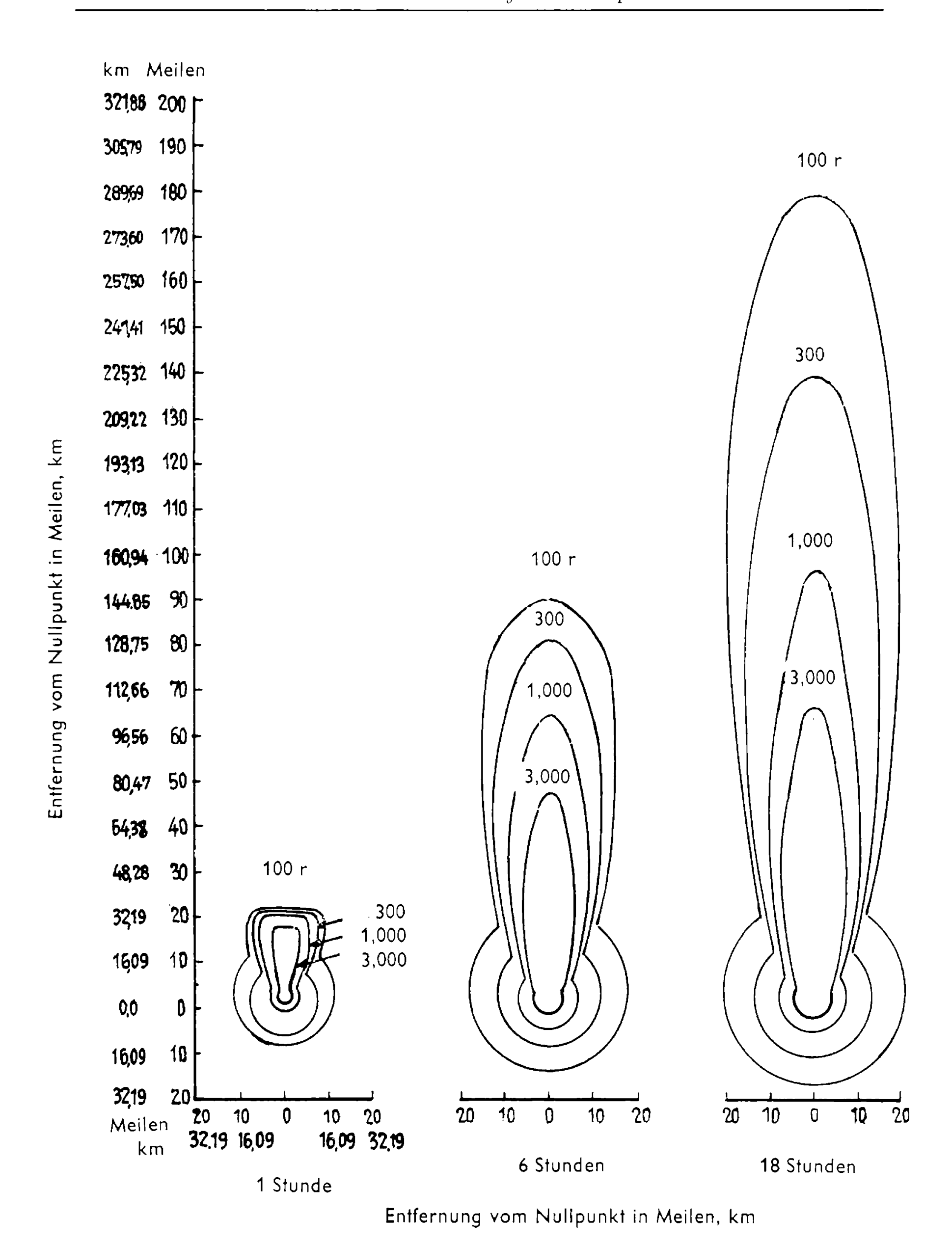


Bild 9.63b *Konturen der Gesamt(akkumulierten) Dosis aus radioaktivem Niederschlag 1, 6 und 18 Stunden nach Bodenexplosion im Megatonnenbereich (24 km/h effektive Windgeschwindigkeit)*

eine Anzahl von Konturen für bestimmte (willkürlich gewählte) runde Zahlenwerte der Dosisleistung, wie sie tatsächlich am Boden 1, 6 und 18 Stunden nach der Explosion festzustellen wären. Eine Reihe von Gesamt-(oder akkumulierten) Dosiskonturen für die gleiche Zeit ist in Bild 9.63b wiedergegeben. Natürlich ändern sich die verschiedenen Dosisleistungen und Dosen allmählich von einer Kontur zur anderen. Ebenso stellt die letzte aufgeführte Konturlinie nicht die Grenze der Verstrahlung dar, weil die Dosisleistung (und Dosis) über eine größere Entfernung stetig sinkt.

9.64 Betrachten wir zunächst einen Ort, der etwa 50 km vom Nullpunkt in Windrichtung liegt. Eine Stunde nach der Explosion wird festgestellt, daß die Dosisleistung ungefähr 30 r pro Stunde beträgt; nach 6 Stunden hat sich die Dosisleistung, die zwischen den Konturen für 1000 und 300 Röntgen pro Stunde liegt, auf ungefähr 800 r pro Stunde erhöht; aber nach 18 Stunden ist sie bis auf ungefähr 200 r pro Stunde heruntergegangen. Die Steigerung der Dosisleistung von der 1. bis zur 6. Stunde bedeutet, daß der radioaktive Niederschlag an dem betreffenden Ort eine Stunde nach der Explosion noch nicht beendet war. Die Abnahme von der 6. bis 18. Stunde ist also durch den natürlichen Zerfall von Spaltungsprodukten zu erklären. Wenn man sich nun Bild 9.63b zuwendet, sieht man, daß die gesamte Strahlendosis, der jemand an der gegebenen Stelle eine Stunde nach der Explosion ausgesetzt war, ganz gering ist, weil der radioaktive Niederschlag hier eben erst eingesetzt hat. Bis zur 6. Stunde hat die Gesamtdosis mehr als 3000 (wahrscheinlich aber um 4000) Röntgen erreicht, und bis zur 18. Stunde hat sich eine Gesamtdosis von rund 5000 Röntgen akkumuliert. Danach wird die Gesamtdosis sich weiterhin bis zum Unendlichkeitswert steigern, aber in einem langsameren Tempo (Abschn. 9.14).

9.65 Als nächstes betrachten wir einen Ort, der rund 160 km vom Nullpunkt in Windrichtung liegt. Eine Stunde nach der Explosion ist die Dosisleistung, wie in Bild 9.63a angegeben, sehr gering, wahrscheinlich sogar null, weil der radioaktive Niederschlag den betreffenden Ort noch nicht erreicht hat. Nach 6 Stunden beträgt die Dosisleistung 10 r pro Stunde und nach 18 Stunden ungefähr 50 r pro Stunde. Der radioaktive Niederschlag beginnt knapp 6 Stunden nach der Explosion und ist nach 18 Stunden im wesentlichen beendet, obwohl dies nicht direkt aus den angegebenen Konturen festgestellt werden kann. Aus Bild 9.63b ist zu entnehmen, daß die gesamte akkumulierte Dosis eine Stunde nach der Explosion null, nach 6 Stunden ungefähr 30 r und nach 18 Stunden nahezu 1000 r beträgt. Die gesamte (Unendlichkeits-)Dosis ist nicht so groß wie an den näher zum Nullpunkt gelegenen Punkten, weil die Menge der den Erdboden erreichenden Spaltungsprodukte mit zunehmender Entfernung von der Explosion abnimmt.

9.66 Im allgemeinen wird deshalb an einem gegebenen Ort in einer Entfernung von einer Bodenexplosion einige Zeit vergehen, bis der radioaktive Niederschlag ankommt. Diese Zeit hängt ab von der Entfernung vom Nullpunkt, von der für das Niedersinken der radioaktiven Teilchen benötigten Zeit und von der Geschwindigkeit des effektiven Windes. Wenn der radioaktive Niederschlag anzukommen beginnt, ist die Dosisleistung der Bestrahlung gering, aber mit zunehmendem radioaktivem Niederschlag wird sie stetig größer.

Nach ein paar Stunden ist der radioaktive Niederschlag im wesentlichen (wenn auch nicht absolut) beendet; dann wird der radioaktive Zerfall der Spaltungsprodukte von einer stetig abnehmenden Dosisleistung begleitet. Ehe der radioaktive Niederschlag beginnt, ist die Gesamtdosis natürlich gleich null, aber nach seiner Ankunft nimmt die gesamte (akkumulierte) Strahlendosis ständig zu, und zwar zunächst rasch und dann etwas langsamer über einen langen Zeitraum, der sich über viele Monate und sogar Jahre erstrecken kann (Tabelle 9.90).

Explosion mit geringem Explosionswert

9.67 Die grundlegenden Erscheinungen des radioaktiven Niederschlags aus einer Bodenexplosion mit geringem Explosionswert sind im wesentlichen die gleichen wie bei einer solchen mit hohem Explosionswert. Eventuell auftretende Unterschiede sind eher eine Frage des Grades als der Art. Die verhältnismäßig größeren Mengen von Spaltungsprodukten aus einer Explosion mit hohem Explosionswert bedeuten, daß die schweren Verstrahlungen sich auf ein größeres Gebiet erstrecken, als es bei geringerem Explosionswert der Fall sein würde. Um aber eine vollständigere Darstellung der radioaktiven Niederschlagsfläche für eine Reihe von Explosionswerten zu liefern, gelten die hier aufgeführten Ergebnisse für eine Bodenexplosion im Kilotonnenbereich und in einem späteren Abschnitt für eine solche im Megatonnenbereich.

9.68 Im Rahmen des Programms für Kernexplosionsversuche in Nevada ist die Verstrahlung in der Umgebung des Explosionspunktes eingehend untersucht worden. Bei der Mehrzahl dieser Versuche ergaben sich die üblichen Verstrahlungsgebiete in der in Bild 9.61 wiedergegebenen Form. Deshalb sind idealisierte Konturen der gleichen Art zweckmäßig, um für Planungszwecke durchschnittliche, typische Werte anzugeben. Die Ausdehnung der Konturen für verschiedene (Bezugs-)Dosisleistungen nach 1 Stunde aus dem radioaktiven Niederschlag einer 20-kt-Bodenexplosion ist in Tabelle 9.68 wiedergegeben, wobei die Windgeschwindigkeit mit rund 24 km/h angenommen ist. Die Bezugswerte wurden aus den nach Beendigung des radioaktiven Niederschlags durchgeführten Messungen der Dosisleistungen errechnet, wie in Abschn. 9.9 angegeben.

Tabelle 9.68 Ungefähre Konturen für die (Bezugs-) Dosisleistung der Rückstandsstrahlung am Erdboden nach 1 Stunde bei Bodenexplosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers

Dosisleistung (r/h)	Radius des Nullpunktkreises m	Verschiebung des Mittelpunktes des Nullpunktkreises m	Entfernung in Mitwindrichtung m	Entfernung in Seitenwindrichtung m
3000	160	130	1600	485
1000	355	225	3700	1125
300	660	355	8530	1130
100	1060	450	18500	2895
30	1530	580	35500	4500
10	2255	675	80500	8210

9.69 Es ist offensichtlich, daß die Dosisleistung dicht am Nullpunkt und ganz besonders im Kraterbereich sehr hoch ist, so daß das Gebiet auf Grund der Strahlengefahr unbewohnbar sein würde. Aber dieses Gebiet wäre wegen der durch Luftdruck und Stoß verursachten völligen Zerstörung sowie wegen der Kraterbildung ohnehin unbewohnbar.

9.70 Außer der Verstrahlung in der Nähe des Nullpunktes, die der Darstellung des Nullpunktkreises in Bild 9.61 entspricht, sind sowohl in Alamogordo als auch auf dem Versuchsgelände von Nevada mehrere Kilometer vom Explosionszentrum entfernt Gebiete entdeckt worden, die etwas radioaktiver als ihre Umgebung waren; es handelt sich dabei um die sog. »heißen Stellen«. Diese Art radioaktiven Niederschlags der Spaltungsprodukte ist wahrscheinlich auf eine besondere Verbindung von meteorologischen, atmosphärischen und bodenmäßig bedingten Gegebenheiten zurückzuführen, die in einem bestimmten Gebiet zu einer verstärkten Ablagerung führten.

Explosionen mit hohem Explosionswert

9.71 Die Konturen für eine Reihe angenommener (Bezugs-)Dosisleistungen zur Zeit $t = 1$ Stunde, die sich auf eine Bodenexplosion mit einem Explosionswert von 1 Megatonne beziehen, sind in Tabelle 9.71 wiedergegeben; es ist eine effektive Windgeschwindigkeit von rund 24 km/h zugrunde gelegt. Wie vorher erzielte man diese Angaben durch Heranziehung der Spaltungsprodukt-Zerfallskurve (Bild 9.8) oder einer entsprechenden mathematischen Formel, um festzustellen, wie groß die Dosisleistung 1 Stunde nach der Explosion gewesen wäre, falls der radioaktive Niederschlag zu diesem Zeitpunkt an allen Punkten bereits aufgehört hätte. Die Ausdehnung der einzelnen in der Tabelle angegebenen Konturen der Dosisleistung in Gegenwindrichtung erhält man, indem man die Verschiebung des Nullpunkt-(GZ)-Kreises vom Radius des Nullpunktkreises abzieht. Zum Beispiel: die Bezugskontur für 10 Röntgen/h erstreckt sich in Gegenwindrichtung über 17,7–2,66 = rund 15 km.

Tabelle 9.71 Ungefähre Konturen für die (Bezugs-) Dosisleistung der Rückstandsstrahlung am Erdboden nach 1 Stunde bei Bodenexplosion eines 1-MT-Atomsprengkörpers

Dosisleistung (r/h)	Radius des Nullpunktkreises km	Verschiebung des Mittelpunktes des Nullpunktkreises km	Entfernung in Mitwindrichtung km	Entfernung in Seitenwindrichtung km
3000	0,69	0,965	35,4	4,99
1000	2,255	1,285	64,4	10,95
300	3,35	1,640	112,65	18,99
100	7,565	1,995	183,5	26,88
30	12,07	2,350	294,5	36,7
10	17,7	2,655	510,2	54,9

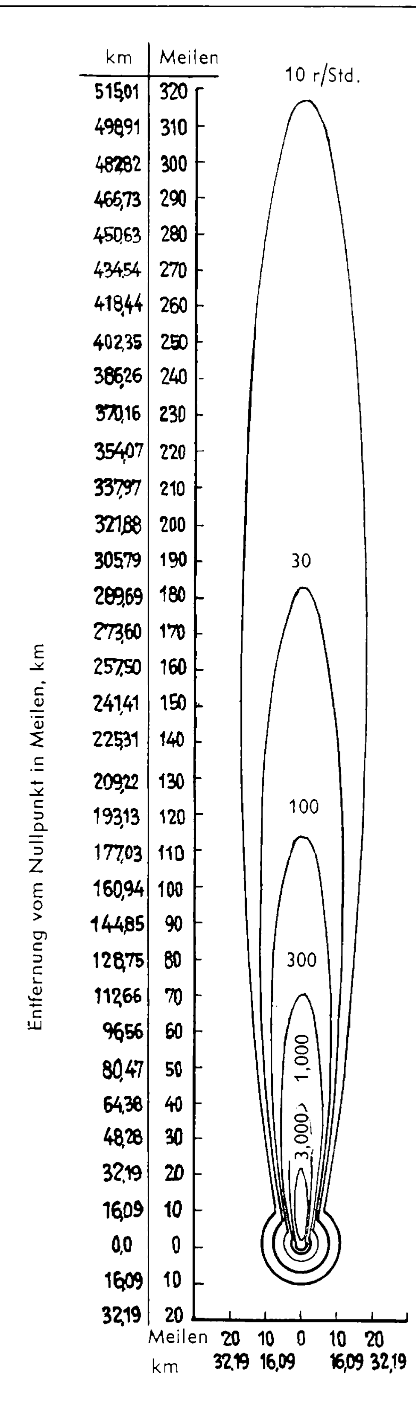


Bild 9.72 Idealisierte Konturen für 1-Stunden-Bezugsdosisleistung bei radioaktivem Niederschlag nach Bodenexplosion eines 1-MT-Atomsprengkörpers (24 km/h effektiver Wind)

9.72 Eine vollständigere (idealisierte) Darstellung des Konturengebietes der (Bezugs-)Dosisleistung zur Zeit $t = 1$ für die oben gegebenen Bedingungen ist in Bild 9.72 wiedergegeben. Wegen der Unsymmetrie des Geländes und wegen der Windwirkungen verlaufen die ellipsenförmigen Konturen des radioaktiven Niederschlags bei der Rückstandsstrahlung nicht genau wie in Bild 9.72. Aber man hat in der Darstellung die Konturen gemäß der in Bild 9.61 dargestellten Form idealisiert.

Das Bild zeigt die Konturen für verschiedene Werte der 1-Stunden-Bezugsdosisleistung bei Bodenexplosion einer Kernwaffe mit einem Explosionswert von einer Megatonne. Die effektive Windgeschwindigkeit beträgt 24 km/h.

Umrechnung: Bei anderem Explosionswert als 1 Megatonne kann das nachstehende angenäherte Umrechnungsgesetz angewandt werden:

$$R = R_0 \times W^{1/3} \quad \text{bei} \quad d = d_0 \times W^{1/3};$$

hierbei ist R_0 die 1-Stunden-(Bezugs-)Dosisleistung für 1 Megatonne bei einer Entfernung d_0; R ist die 1-Stunden-(Bezugs-)Dosisleistung für W Megatonnen bei einer Entfernung d.

Beispiel:

Gegeben: eine Bodenexplosion von 10 Megatonnen Explosionswert.

Suche: den Wert der Dosisleistung aus radioaktivem Niederschlag an einem Punkt 346 km vom Nullpunkt in Mitwindrichtung zum Zeitpunkt der Ankunft des radioaktiven Niederschlags an diesem Punkt, bei Annahme einer effektiven Windgeschwindigkeit von 24 km/h.

Lösung: Da $W = 10$ ist, ist der Wert $W^{1/3} = 10^{1/3} = 2{,}15$. Die Entfernung d beträgt 346 km, so daß $d_0 = d/W^{1/3} = 346/2{,}15 = 161$ km ist. Aus Bild 9.72 ist zu ersehen, daß bei einer Bodenexplosion von 1 Megatonne der Wert R_0 in einer Entfernung von 161 km vom Nullpunkt in Mitwindrichtung ungefähr 150 Röntgen/h beträgt. Somit ergibt die 1-Stunden-Bezugsdosisleistung bei 346 km in Mitwindrichtung bei der 10-Megatonnen-Explosion

$150 \times 2{,}15 = 322$ Röntgen je Stunde.

Die Ankunftszeit des radioaktiven Niederschlags an diesem Punkt liegt ungefähr $346/24 = 14{,}3$ Stunden nach der Explosion. Nach Bild 9.8 ist der Zerfallsfaktor für 14,3 Stunden 0,04. Also beträgt die gesuchte Dosisleistung an einem Punkt 346 km vom Nullpunkt in Mitwindrichtung bei einer Bodenexplosion von 10 Megatonnen zur Zeit der Ankunft des radioaktiven Niederschlags

$0{,}04 \times 322 = 12{,}9$ Röntgen/h.

9.73 Es ist von äußerster Wichtigkeit, daß man die Bedeutung der Konturen in Bild 9.72 nicht mißversteht. Die Tatsache, daß die (Bezugs-)Dosisleistung zur Zeit

$t = 1$ sich auf große Entfernungen vom Nullpunkt erstreckt, darf nicht dahin verstanden werden, daß derartige Dosisleistungen 1 Stunde nach der Explosion auch tatsächlich vorkommen. In Wirklichkeit würde natürlich nur ein sehr kleiner Teil der dargestellten Fläche zu diesem Zeitpunkt von radioaktivem Niederschlag betroffen sein. Wie in Abschn. 9.64ff erklärt, werden in den meisten Gebieten verschiedene Stunden vergehen, bevor der radioaktive Niederschlag ankommt. Die angenommene (Bezugs-)Dosisleistung zur Zeit $t = 1$ ist aber, wie das neben Bild 9.72 angeführte Beispiel zeigt, dennoch für Besprechungen sehr nützlich.

Umrechnung

9.74 Die Konturen der Rückstandsstrahlung bei Bodenexplosion bestimmten Explosionswertes in der Nähe des Nullpunktes kann aus den Tabellen 9.68 und 9.71 oder aus Bild 9.72 unter Anwendung angenäherter Umrechnungsgesetze abgeleitet werden. Der Einfachheit halber sei angenommen, daß der effektive Wind in allen Fällen der gleiche ist. Falls die (Bezugs-)Dosisleistung zur Zeit $t = 1$ in einer Entfernung vom Nullpunkt bei Bodenexplosion von W-Megatonnen-Explosionswert R Röntgen pro Stunde beträgt, dann ist nach dem angenäherten Umrechnungsgesetz

$$R = R_0 \cdot W^{1/3} \text{ in einer Entfernung } d = d_0\, W^{1/3};$$

hierbei ist R_0 bei Bodenexplosion von 1 Megatonne Explosionswert die (Bezugs-)Dosisleistung zur Zeit $t = 1$ in einer Entfernung d_0 vom Nullpunkt. Ebenso wie für die Entfernungen d (und d_0) gilt das gleiche Umrechnungsgesetz auch für alle anderen Konturdimensionen, z. B. für den Radius und die Verschiebungen der Nullpunktkreise sowie für die Entfernung in Mitwind- und Seitenwindrichtung.

9.75 Mit anderen Worten: man kann die Konturen bei einer Ausbeute von W Megatonnen dadurch erhalten, daß man die in Tabelle 9.71 aufgeführten Werte einschließlich der Entfernungen und Dosisleistungen mit dem Faktor $W^{1/3}$ multipliziert. Es ist festgestellt worden, daß dieses einfache Kubikwurzel-Umrechnungsgesetz ziemlich gute Ergebnisse für Spaltungsenergien von 0,1 Megatonnen (100 kt) bis 10 Megatonnen ergibt. Bei Energiemengen unter 100 kt ist es vielleicht vorzuziehen, in ähnlicher Weise aus den in Tabelle 9.68 für die 20-kt-Bodenexplosion angegebenen Werten umzurechnen. Dann erhält man die Konturen für W kt dadurch, daß man die in Tabelle 9.68 aufgeführten Werte, die die Dosisleistung enthalten, mit dem Faktor $(W/20)^{1/3}$ multipliziert. Im allgemeinen sollte, falls die Atomwolke die Tropopause nicht erreicht oder durch sie nicht stark abgeflacht wird, die Umrechnung aus den Werten für die 20-kt-Bodenexplosion in Tabelle 9.68 erfolgen. Erreicht aber die Wolke die Tropopause, so ergibt eine Umrechnung der in Tabelle 9.71 (oder Bild 9.72) enthaltenen Werte für 1 Megatonne bessere Ergebnisse.

9.76 Die oben beschriebenen Umrechnungsverfahren sind (ungefähr) anwendbar, wenn die Geschwindigkeit des effektiven Windes immer rund 24 km/h beträgt. Wenn die tatsächliche Geschwindigkeit des effektiven Windes von diesem Wert abweicht,

kann man – besonders bei ziemlich großen Entfernungen vom Nullpunkt – eine angenäherte Berichtigung auf folgende Weise durchführen: angenommen, die Kontur bei einer bestimmten Bezugsdosisleistung erstreckt sich bei einer Geschwindigkeit des effektiven Windes von 24 km/h auf 193 km in Mitwindrichtung. Dann beträgt die entsprechende Entfernung bei einer Geschwindigkeit des effektiven Windes von 32 km/h bei gleichem Wert der Bezugsdosisleistung ungefähr $(32/24) \times 193 =$ rund 257 km.

9.77 Die oben (Abschn. 9.71ff) beschriebenen Ergebnisse bauen sich auf der Voraussetzung auf, daß die Spaltungsausbeute und die gesamte Energiemenge gleich sind, ebenso wie es der Fall sein würde, wenn alle Energie der Explosion aus den Spaltungsprodukten herrührte.

Aber bei einigen Kernwaffen mit größerem Explosionswert wird ein Teil der Energie durch thermonukleare (Verschmelzungs-)Reaktionen erzeugt, die nicht zur Radioaktivität des Niederschlags beitragen (Abschn. 1.13 und 1.53). Dieser Tatsache kann wie folgt Rechnung getragen werden: Angenommen, der gesamte Explosionswert beträgt W Megatonnen und f möge den Teil der Energie darstellen, der auf die Spaltung zurückzuführen ist. Die Berechnungen werden, wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, zunächst für einen Explosionswert von W Megatonnen durchgeführt; die Bezugsdosisleistung für alle Entfernungen wird dann mit f multipliziert und ergibt die gewünschte Bezugsdosisleistung für die betreffende Entfernung.

Faktoren, die das Konturgebiet des radioaktiven Niederschlags beeinflussen

9.78 Das Konturgebiet der Verstrahlung in der Nähe des Nullpunktes kann mit ziemlicher Genauigkeit vorausgesagt werden, aber das genaue Gebiet des Niederschlags der kleinen radioaktiven Teilchen aus der Atomwolke vorauszusagen, ist nahezu unmöglich. Außer den offensichtlich veränderlichen Größen, wie sie der Explosionswert und die Explosionshöhe darstellen, haben noch die meteorologischen Bedingungen und der unregelmäßige Windverlauf in Höhen von etwa 24,5 oder 30,5 km bis hinunter zum Erdboden einen wichtigen Einfluß. Es wird sich später noch zeigen (s. Abschn. 9.133), daß es möglich ist, den Einfluß des Windes auf die Richtung, die der radioaktive Niederschlag nimmt, in gewissem Maße abzuschätzen; die in Bild 9.72 dargestellten Konturen schließen eine idealisierte Schätzung dieses Einflusses ein. Es besteht aber immer die Möglichkeit, daß sich die Winde in größeren Höhen plötzlich und unerwartet ändern, wie es gelegentlich bei Kernwaffenversuchen der Fall gewesen ist.

9.79 Ein Faktor, über den eine bemerkenswerte Ungewißheit besteht, der aber bei der Verteilung der Verstrahlung aus radioaktivem Niederschlag eine wichtige Rolle spielt, ist die Größe der Teilchen in der Atomwolke. Viele dieser Teilchen sind im Durchmesser höchstens ein paar tausendstel Zentimeter dick, und es kann unter Umständen einen Tag oder noch länger dauern, bis sie zur Erde fallen. Während dieser Zeit werden sie sich einige Hunderte von Kilometern vom Explosionspunkt entfernt

haben. Deshalb kann der radioaktive Niederschlag zu einer schweren Verstrahlung des Bodens noch in Entfernungen von der Kernexplosion führen, in denen alle anderen Wirkungen – Luftdruck, Stoßwelle, thermische Strahlung und Anfangsstrahlung – nicht mehr spürbar sind.

9.80 Es ist zwar richtig, daß die Wolkenteilchen, bis sie den Boden erreichen, um so mehr an Radioaktivität verlieren, je länger sie in der Luft schweben. Aber die Gesamtmenge des durch die Bodenexplosion einer Kernwaffe mit hohem Explosionswert (im Megatonnenbereich) radioaktiven Materials ist so gewaltig, daß die Radioaktivität auch dann noch stark sein kann, wenn sie im Verlauf der Zeit abgenommen haben sollte. Sowohl aus diesem Grunde als auch wegen der ausgedehnten Gebiete, die davon betroffen werden, muß die Rückstandsstrahlung (des radioaktiven Niederschlags) solcher Explosionen als eine der Hauptwirkungen von Kernwaffen angesehen werden.

9.81 Falls die anderen Bedingungen, z. B. der Explosionswert, die Explosionshöhe und der Windverlauf die gleichen wären, würde eine Atomwolke, die in der Hauptsache aus ziemlich großen Teilchen besteht, zu einem relativ kleinen Gebiet starker Verstrahlung führen. Dagegen würde, wenn die meisten Teilchen sehr klein wären, das verstrahlte Gebiet viel größer, obwohl die Strahlungsintensität, insbesondere weiter vom Nullpunkt weg, nicht so stark wäre. Aber immerhin könnte sie noch stark genug sein, um eine Gefahr darzustellen.

9.82 Es ist deshalb klar, daß die Konturen des Niederschlagsgebietes weitgehend von der Größenverteilung der Teilchen in der Atomwolke abhängen. Diese wiederum hängt in einer bisher noch nicht ergründeten Weise von der Art des Geländes ab. Es besteht kaum ein Zweifel, daß eine Bodenexplosion in einer Stadt zu einer ganz anderen Größenverteilung der Teilchen und folglich auch zu ganz anderem radioaktivem Niederschlag führt als die gleiche Explosion im freien Gelände. Auf jeden Fall würde die Art des Untergrundes sowohl in einer Stadt als auch auf dem Lande wahrscheinlich die Teilchengröße der Atomwolke beeinflussen.

9.83 Im Idealfall werden die Konturen des radioaktiven Niederschlags, wie Bild 9.72 zeigt, ellipsenförmig (oder zigarrenförmig) sein und sich in Mitwindrichtung vom Explosionspunkt weg erstrecken; die lange Achse veräuft dabei in der Richtung des mittleren Windverlaufs. Wenn sich der Windverlauf während des Abziehens der Teilchen vom Nullpunkt verändert, können die Konturen die Form einer Banane oder eines Bumerangs annehmen. Aber selbst im Idealfall, d. h. wenn die Konturen ellipsenförmig verlaufen, hängen die Dosisleistungen in verschiedenen Entfernungen von den Wirkungen aller oben erwähnten Faktoren ab und können sich den vorliegenden Gegebenheiten gemäß ändern.

9.84 Wie bereits erwähnt (Abschn. 9.70) kann ein Zusammenwirken von Umständen, z. B. der atmosphärischen Bedingungen und der Geländeform, an gewissen Stellen (sog. »heißen Stellen«) oft zu einer etwas höheren Ablagerung des radioaktiven Niederschlags führen. Deshalb kann damit gerechnet werden, daß die Strahlungsintensität in einem Gebiet starken radioaktiven Niederschlags von einer Stelle zur anderen verschieden ist, so daß die Konturen in Bild 9.72, die eine stetige Abnahme

der Dosisleistung mit zunehmendem Abstand vom Explosionszentrum kennzeichnen, als idealisiert anzusehen sind. Sie stellen ein durchschnittliches Verhalten dar, das auf Grund verschiedener Faktoren, wie Luftströmungen, Regen, Schnee und anderer meteorologischer Bedingungen, veränderlich sein kann. Durch die Verteilung des radioaktiven Niederschlags würden starke Winde in Nähe der Erdoberfläche den Grad der Verstrahlung in bestimmten Gebieten verringern, aber das kann leicht zur Folge haben, daß die radioaktiven Teilchen in ein vorher nicht (oder nur leicht) verstrahltes Gebiet getragen werden. Die möglichen Auswirkungen von Regenfällen bei einer Luftexplosion sind in Abschn. 9.50 erörtert. Etwa ähnliche Umstände könnten auch die Verteilung der Verstrahlung nach einer Bodenexplosion beeinflussen.

9.85 Ein weiterer Gesichtspunkt des radioaktiven Niederschlags, der in Bild 9.72 nicht dargestellt ist, ist die schädliche Wirkung der Betateilchenstrahlen bei der Berührung mit der Haut. Die Dosen, auf die sich die Konturen beziehen, sind im wesentlichen auf die Gammastrahlung der Spaltungsprodukte und anderer Sprengkörperüberreste zurückzuführen. Falls man den radioaktiven Niederschlag eine beträchtliche Zeit lang auf der Haut läßt, können die Betateilchen zusätzlich zu den anderen Folgen einer Bestrahlung schwere Verbrennungen verursachen (s. Kap. XI).

Verstrahlung durch die hochenergiehaltige Explosion vom 1. März 1954

9.86 Die vorstehenden Ausführungen können durch die Beschreibung der Beobachtungen ergänzt werden, die bei der Verstrahlung durch radioaktiven Niederschlag auf den Marshallinseln im Zusammenhang mit der hochenergiehaltigen Versuchsexplosion auf dem Bikini-Atoll am 1. März 1954 gemacht wurden[1]). Der Atomsprengkörper wurde auf einer Koralleninsel zur Explosion gebracht; der radioaktive Niederschlag, der aus radioaktiven Teilchen mit einem Durchmesser von etwa 2–500 μ bestand, verstrahlte ein längliches, zigarrenförmiges Gebiet, das sich auf annähernd 350 km in Mitwindrichtung erstreckte und dessen Breite sich bis zu rund 65 km ausdehnte. Außerdem gab es rund 32 km vom Explosionspunkt in Gegenwindrichtung ein stark verstrahltes Gebiet. Eine Gesamtfläche von über 18000 km^2 wurde derart verstrahlt, daß ein Überleben nur bei Evakuierung des Gebietes oder bei Vorhandensein von Schutzmaßnahmen möglich gewesen wäre.

9.87 Aus Messungen der Strahlungsdosis an mehreren Stellen und aus Berechnungen unter Zugrundelegung bekannter physikalischer Meßwerte und früherer Erfahrungen konnten ziemlich gute Schätzungen mehrerer Niederschlagskonturen angestellt werden. Dies ist in leicht idealisierter Form in Bild 9.87 für die gesamte, in einem Zeitraum von 36 Stunden nach der Explosion empfangene Gammastrahlung (oder akkumulierte Dosis) in Röntgen wiedergegeben. Man sollte dabei beachten, daß die Dosen, auf die sich die Konturen in Bild 9.87 beziehen, Werte darstellen, die aus den Ablesungen von Meßgeräten errechnet wurden. Sie stellen die maximale Be-

[1]) »Die Wirkungen hochenergiehaltiger Kernexplosionen«, Bericht der US-Atomenergiekommission, Government Printing Office, Febr. 55.

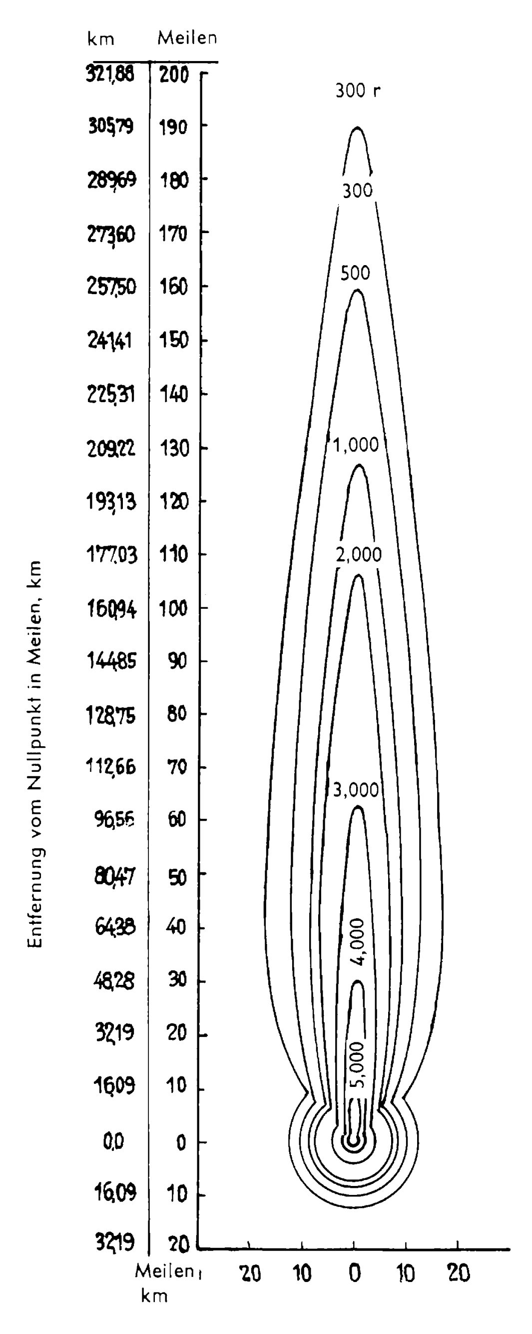


Bild 9.87 Idealisierte (akkumulierte) Dosiskonturen aus radioaktivem Niederschlag.

strahlung dar und würden nur von solchen Personen aufgenommen, die die ganze Zeit hindurch ohne Strahlenschutz im Freien blieben. Irgendein Schutz, z. B. innerhalb eines Gebäudes, oder die Evakuierung dieses Gebietes würde die aufgenommene Dosis reduziert haben. Dagegen würden Personen, die länger als 36 Stunden nach der Explosion in diesem Gebiet geblieben wären, größeren Dosen der Rückstandsstrahlung ausgesetzt gewesen sein.

9.88 Eine über 36 Stunden verteilte Strahlendosis von 700 Röntgen würde sich wahrscheinlich in nahezu allen Fällen als tödlich erweisen. Es hat deshalb den Anschein, daß nach der Versuchsexplosion vom 1. März 1954 in einem in Mitwindrichtung gelegenen Gebietsstreifen von ungefähr 225 km Länge und 32 km Breite die Radioaktivität aus dem Niederschlag ausreichend war, um das Leben nahezu aller Menschen, die sich nach der Explosion mindestens 36 Stunden ohne Schutzmaßnahme in diesem Raum aufgehalten hätten, schwer zu gefährden. Bei Entfernungen von mehr als 350 km in Mitwindrichtung wäre die Zahl der durch Strahlung verursachten Todesfälle geringfügig, obwohl wahrscheinlich viele Erkrankungen eingetreten wären, die zu einer vorübergehenden physischen Behinderung geführt hätten.

9.89 Der Zeitraum von 36 Stunden nach der Explosion, für den Bild 9.87 die akkumulierte Bestrahlung wiedergibt, wurde etwas willkürlich als ein Zeitraum gewählt, in dem der gesamte in der Umgebung verbleibende radioaktive Niederschlag im wesentlichen zur Erde heruntergekommen wäre. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß – wie in diesem Kapitel verschiedentlich festgestellt – die Strahlungen aus Spaltungsprodukten lange Zeit hindurch, wenn auch in ständig abnehmendem Maße, emittiert werden. Die Dauer der äußeren Gammastrahlung kann im Zusammenhang mit dem Versuch vom 1. März 1954 veranschaulicht werden, indem man die Verhältnisse an zwei verschiedenen Stellen auf dem Rongelap-Atoll auf den Marshallinseln betrachtet. Der radioaktive Niederschlag begann ungefähr 4–6 Stunden nach der Explosion und hielt mehrere Stunden an.

9.90 An der Nordwestspitze des Atolls, rund 160 km von der Explosionsstelle entfernt, betrug die Radioaktivität während der ersten 36 Stunden nach Einsetzen des radioaktiven Niederschlags 2300 Röntgen. Das war der schwerste radioaktive Niederschlag, der in einer solchen Entfernung vom Nullpunkt gemessen wurde. Ungefähr 40 km südwärts und 185 km vom Nullpunkt entfernt betrug die gemessene Dosis für den gleichen Zeitraum nur 150 Röntgen. Die Bewohner des Rongelap-Atolls befanden sich in diesem Gebiet: sie waren, bevor sie etwa 44 Stunden nach Einsetzen des radioaktiven Niederschlags evakuiert wurden, Strahlungsdosen bis zu 175 Röntgen ausgesetzt (s. Abschn. 11.47). Die theoretisch maximale Bestrahlung in diesen beiden Atollgebieten ist für verschiedene Zeiten nach der Explosion entsprechend dem allgemein anerkannten Zerfallsgesetz (Abschn. 9.7 und 9.112) in Tabelle 9.90 aufgeführt.

9.91 Es muß betont werden, daß die in Tabelle 9.90 aufgeführten errechneten Werte die Maximaldosis an den gegebenen Stellen darstellen, weil sie auf der Annahme beruhen, daß die der Strahlung ausgesetzten Personen jeden Tag 24 Stunden im Freien sind und daß keinerlei Maßnahmen ergriffen wurden, um die Verstrahlung zu

Tabelle 9.90 Errechnete Strahlungsdosen an 2 Punkten des Rongelap-Atolls aus radioaktivem Niederschlag nach dem Versuch vom 1. 3. 54 in Bikini

Bestrahlungsdauer nach der Explosion	In diesem Zeitraum akkumulierte Dosis (in Röntgen) an bewohnten Stellen	an unbewohnten Stellen
In den ersten Stunden	140	2150
36 Stunden bis 1 Woche	101	1310
1 Woche bis 1 Monat	73	950
1 Monat bis 1 Jahr	83	1080
Insgesamt bis zu 1 Jahr	397	5490
1 Jahr bis unendlich	etwa 129	etwa 1680

beseitigen (s. Abschn. 12.81ff). Außerdem ist die Verwitterung unberücksichtigt geblieben, d. h. das Hineinspülen der Niederschlagsteilchen in den Boden durch Regen oder die mögliche Verstreuung der Teilchen durch den Wind. Zum Beispiel wurde festgestellt, daß auf einigen Teilen der Marshall-Inseln am 25. Tage nach der Explosion die gemessenen Dosisleistungen ungefähr 40% unter den errechneten Werten lagen. Man wußte, daß es nach der 2. Woche geregnet hatte, und daß vermutlich dadurch die größere Schwächung der Verstrahlung verursacht wurde.

9.92 Zum Abschluß dieser Abhandlung über die Verstrahlung durch radioaktiven Niederschlag ist zu erwähnen, daß die in Bild 9.87 aufgezeigten Dosisbereiche für den Zeitraum von 36 Stunden, die das Niederschlagsgebiet in der Umgebung des Bikini-Atolls nach der hochenergiehaltigen Explosion vom 1. März 1954 darstellen, sowie die in Bild 9.72 aufgezeigten Bereiche der (Bezugs-)Dosisleistung nach einer Stunde als mehr oder weniger typisch angesehen werden dürften, so daß sie für Planungszwecke herangezogen werden können. Dennoch sollte man sich darüber im klaren sein, daß sie nicht als absolut gültige Richtlinien anzusehen sind. Die besonderen Verhältnisse, die sich auf den Marshallinseln ergaben, waren das Ergebnis des Zusammenwirkens von Umständen, die durch den Explosionswert, die Explosionshöhe, die Geländeform unter dem Explosionspunkt, den Windverlauf über einem großen Gebiet und bis zu großer Höhe sowie die sonstigen Wetterverhältnisse bedingt waren. Eine Veränderung eines dieser Faktoren hätte das Niederschlagsgebiet in mancher Hinsicht beträchtlich beeinflussen können.

9.93 Mit anderen Worten: es ist festzustellen, daß die vorstehend geschilderten Niederschlagsverhältnisse nach der Bodenexplosion einer Kernwaffe mit hohem Explosionswert eintreten können, aber nicht unbedingt eintreten müssen. Sofern der Windverlauf bekannt ist, kann die Richtung, die der radioaktive Niederschlag nimmt, ziemlich genau berechnet werden. Aber der Explosionswert oder die Höhe der Explosion sind bei einem Kernwaffenangriff nicht vorauszusehen. Folglich ist es unmöglich, schon vorher zu bestimmen, wie weit das schwer verstrahlte Gebiet sich erstrecken wird, obgleich der Zeitpunkt des Einsetzens des radioaktiven Niederschlags an einem beliebigen Punkt errechnet werden könnte, wenn die Geschwindigkeit und Richtung des effektiven Windes bekannt wären.

9.94 Trotz der Unberechenbarkeit des genauen Niederschlagsgebietes kann man aus den obigen Ergebnissen höchst wichtige Schlüsse ziehen. Einer dieser Schlüsse ist, daß unter gewissen Voraussetzungen die Rückstandsstrahlung noch in großen Entfernungen von einer Kernexplosion weit über die Reichweite von Luftdruck, Stoß, thermischer Strahlung und Anfangsstrahlung hinaus eine schwere Gefahr darstellen kann. Eine andere Folgerung ist, daß man Pläne aufstellen kann, um die Gefahr auf ein Mindestmaß zu verringern, aber daß derartige Pläne elastisch sein müssen, damit man sie den besonderen Verhältnissen, die sich nach einem Angriff ergeben, anpassen kann.

Die radiologische Kriegführung

9.95 Man hat eine Zeitlang die Möglichkeit in Betracht gezogen, radioaktives Material bei der sog. »radiologischen Kriegführung« absichtlich als Angriffswaffe einzusetzen. Der Gedanke, von dem man dabei ausging, war folgender: die Verstrahlung von Gebieten, Fabriken und Maschinen würde deren Verwendung entweder unmöglich oder sehr gefährlich machen, ohne daß dabei Material zerstört würde. Um wirksam zu sein, müßte ein radioaktiver Kampfstoff Gammastrahlen emittieren und eine Halbwertszeit von einigen Wochen oder Monaten haben. Radioisotope mit langer Halbwertszeit geben ihre Strahlen zu langsam ab, um wirksam zu sein, es sei denn, man verwendete sie in großen Mengen; die Radioisotope mit kürzerer Halbwertszeit hingegen zerfallen zu schnell, um eine größere Gefahr darzustellen.

9.96 Selbst wenn ein Radioisotop mit geeigneten Eigenschaften, das sich außerdem leicht herstellen ließe, als radioaktiver Kampfstoff gewählt würde, wären die mit der Herstellung, dem Transport und dem Einsatz der intensive Gammastrahlen emittierenden Waffe verbundenen Probleme nicht leicht zu lösen. Überdies würde die Lagerung radioaktiven Materials Schwierigkeiten bereiten. Andere Waffen können im voraus hergestellt werden, um im Notfall einsatzbereit zu sein. Man kann sie lange Zeit auf Lager halten, ohne daß sie verderben. Dies gilt nicht für radioaktive Kampfstoffe, denn der natürliche Zerfall würde zu einem dauernden Verlust aktiven Materials führen. Die Herstellung eines besonderen Radioisotops ist zumindest ein langsamer Prozeß, und der fortgesetzte und unvermeidliche Verlust erwiese sich deshalb als ein schwerer Nachteil.

9.97 Mit der Entwicklung von Atomsprengkörpern mit hohem Explosionswert hat sich die Situation geändert. Die Explosion solcher Sprengkörper in geringer Höhe kann eine Verstrahlung großer Gebiete weit über den Bereich physischer Schäden hinaus verursachen. Infolgedessen sind diese Sprengkörper eigentlich radioaktive Kampfmittel. Statt die radioaktiven Stoffe im voraus herzustellen und zu lagern, was mit Schwierigkeiten verbunden ist, werden die radioaktiven Substanzen bei der Explosion durch Spaltung erzeugt. Die radiologische Kriegführung hat damit automatisch den Wert von Kernwaffen mit hohem Explosionswert als Angriffsmittel gesteigert.

Die Verstrahlung von Gebieten

9.98 In Abschn. 9.95 wurde darauf hingewiesen, daß die Verstrahlung die Nutzung ausgedehnter Gebiete auf längere Zeit unmöglich machen könnte. Hierbei sind zwei Gesichtspunkte beachtenswert. Erstens: die unmittelbare Wirkung der Bestrahlung auf Menschen, die in einem verstrahlten Gebiet leben oder arbeiten müssen; zweitens: die indirekte Wirkung durch den Genuß von Nahrungsmitteln, die in diesem Gebiet angebaut (und Tieren, die dort gezüchtet) werden. Die Methoden der Berechnung der Bestrahlungsdosis aus Spaltungsprodukten – vorausgesetzt, daß keine Schutzmaßnahmen getroffen sind – sind in diesem Kapitel (Abschn. 9.95) aufgeführt (siehe auch Bild 12.107 und 12.108). Die Zeit, die man sich an einer gewissen Stelle aufhalten darf, kann also damit bestimmt werden, vorausgesetzt, daß der gesamten Bestrahlungsdosis eine gewisse Grenze gesetzt ist. Der Wert einer solchen Tolerenzdosis kann nicht vorher festgesetzt werden, weil er ausschließlich von den gegebenen Umständen abhängt.

9.99 In verstrahlten landwirtschaftlichen Gebieten könnte die Gefahr für die Arbeitskräfte verringert werden, indem die Erde so umgepflügt wird, daß die Teilchen des radioaktiven Niederschlags untergegraben werden. Aber dann bleibt noch immer die Frage der Aufnahme von Spaltungsprodukten aus dem Boden durch Pflanzen und ihr Eindringen in den menschlichen Körper bei der Nahrungsaufnahme. Man weiß, daß manche Elemente leichter als andere aufgenommen werden, aber ihr tatsächliches Verhalten hängt von der Bodenart und anderen Faktoren ab. Dieses überaus schwierige Problem wird zur Zeit untersucht, um das Ausmaß der Gefahr zu ermitteln, die aus der Aufnahme von Spaltungsprodukten durch Pflanzen gegebenenfalls entstehen kann, und um zu erforschen, wie diese Aufnahme auf ein Mindestmaß verringert werden kann.

Die Verstrahlung bei Untererdexplosionen

9.100 Das Ausmaß der Verstrahlung durch Rückstandsstrahlen aus einer Untererdexplosion hängt in erster Linie von der Tiefe der Explosion ab. Wenn die Explosion in ausreichender Tiefe unter der Erdoberfläche erfolgt, entweicht praktisch nichts von den Sprengkörperresten und den von Neutronen induzierten radioaktiven Stoffen in die Atmosphäre. Es kommt also in diesem Fall zu keinem nennenswerten radioaktiven Niederschlag. Erfolgt die Explosion aber dicht unter der Oberfläche, so daß der Feuerball tatsächlich durchbricht, so sind die Folgen nicht viel anders als bei einer Bodenexplosion.

9.101 Es wird in Wirklichkeit ein allmählicher Übergang stattfinden von den Merkmalen einer hohen Luftexplosion als einem Extrem, wobei alle radioaktiven Sprengkörperreste in die Atmosphäre geschleudert werden, bis zur tiefen Untererdexplosion als dem anderen Extrem, wobei die radioaktiven Stoffe unter der Erdoberfläche bleiben. In keinem dieser Fälle wird ein nennenswerter örtlicher radio-

aktiver Niederschlag auftreten. Zwischen diesen beiden Extremen liegen die Bodenexplosionen oder niedrigen Luftexplosionen, bei denen eine ausgedehnte Verstrahlung durch radioaktiven Niederschlag erfolgt. Hierzu gehören auch Untererdexplosionen in geringer Tiefe, deren Auswirkungen ähnlich sind. Mit zunehmender Explosionstiefe bleiben mehr Überreste des Atomsprengkörpers in der Umgebung des Explosionspunktes, d. h. im und rund um den Krater, und dementsprechend weniger Material geht in die obere Atmosphäre, um in einiger Entfernung als radioaktiver Niederschlag herunterzufallen.

9.102 Da eine Untererdexplosion in geringer Tiefe, bei der der Feuerball vom Boden aus hochsteigt, im wesentlichen einer Luftexplosion in geringer Höhe gleichkommt, bei der ein großer Teil des Feuerballs den Erdboden berührt, braucht diese Art der Kernexplosion nicht weiter erörtert zu werden. Interessant hingegen ist der Fall einer Untererdexplosion in einer solchen Tiefe, daß der Feuerball gar nicht auftaucht, sondern nur eine große Menge von Staub (oder Wasser) in Form einer Säule in die Luft hochgeschleudert wird (Abschn. 2.67).

9.103 Zu bemerken ist, daß die durch Einfangen von Neutronen entstehenden Radioisotope, z. B. Natrium-24 (Abschn. 9.21), zu den Rückstandsstrahlungen aus einer Untererdexplosion beitragen. Aber verglichen mit den Strahlungen aus Spaltungsprodukten ist dieser Anteil ebenso wie bei einer Bodenexplosion so gering, daß er unberücksichtigt bleiben kann.

9.104 Bei Untererdexplosion in mittlerer Tiefe bildet sich ein bedeutender Krater. Ein großer Teil des radioaktiven Materials bleibt im Kraterbereich, zum Teil, weil es nicht herausgeschleudert wird und teilweise, weil die größeren Stücke verstrahltes Gestein, Erde und Schutt, die in die Luft geschleudert wurden, in der Nähe der Explosion wieder herunterfallen. Die feineren Teilchen, die direkt oder in Form einer Bodenwalze (Abschn. 2.71) entstehen, bleiben in der Luft schweben und fallen in einiger Entfernung vom Nullpunkt als radioaktiver Niederschlag zur Erde.

9.105 Das Konturenbild des radioaktiven Niederschlags hängt von dem Explosionswert, der Explosionstiefe, der Bodenart und auch von Wind- und Wetterverhältnissen ab. Wenn die sonstigen Umstände mehr oder weniger gleich sind, wird nach einer Untererdexplosion die Verstrahlung des Kratergebietes ungefähr die gleiche sein wie bei einer Bodenexplosion mit gleichem Explosionswert. Aber das gesamte verstrahlte Gebiet ist bei der Untererdexplosion (in geringer Tiefe) größer, weil der radioaktive Niederschlag eine größere Menge an Spaltungsprodukten enthält.

9.106 Der radioaktive Niederschlag nach einer Unterwasserexplosion in geringer Tiefe, wie sie im Juli 1946 (Abschn. 2.49) beim *Baker*-Versuch auf dem Bikini-Atoll erfolgte, ist fast der gleiche wie bei der eben beschriebenen Untererdexplosion. Bei diesem Versuch stieg die Wolke nicht so hoch wie bei einer Luftexplosion gleichen Explosionswertes. Dadurch begann der radioaktive Niederschlag, der eigentlich ein radioaktiver Regen war, schon sehr bald nach der Explosion niederzugehen. Der erste radioaktive Niederschlag (oder die Abregnung) erreichte die Oberfläche der Lagune etwa innerhalb einer Minute nach der Explosion. Ein großer Teil der Spaltungs-

produkte (und sonstigen Aktivität) fiel also in kurzer Zeit in einem Umkreis von einigen tausend Metern von der 20-kt-Explosion herunter.

9.107 Beim *Baker*-Versuch auf Bikini bildete sich 10–12 Sekunden nach der Explosion die Bodenwalze, die aus einer radioaktiven Wolke oder einem Nebeldunst kleiner Wassertröpfchen bestand und sich schnell nach außen ausbreitete (Abschn. 2.57). Dies trug zweifellos zur Radioaktivität bei, die sich auf den Schiffen in der Lagune ablagerte, aber man ist jetzt der Ansicht, daß die Bodenwalze als Verstrahlungsquelle weniger bedeutend ist als das Wasser (die Abregnung), das aus der Wolke niederfällt.

9.108 Ein bedeutender Unterschied zwischen einer Unterwasserexplosion und einer Untererdexplosion liegt darin, daß die im Wasser bleibende Radioaktivität sich nach und nach verteilt, während dies im Erdboden nicht der Fall ist. Durch die Streuung verschiedener Sprengkörperreste, die sich mit großen Wassermengen außerhalb des verstrahlten Gebietes vermengen, und durch den natürlichen Zerfall nimmt die Strahlungsintensität des Wassers, in dem die Kernexplosion erfolgte, ziemlich schnell ab. Die Geschwindigkeit der Abnahme und der Ausbreitung des aktiven Materials ist aus Tabelle 9.108 ersichtlich; diese Ergebnisse wurden bei dem *Baker*-Versuch in Bikini gewonnen. Hier hatte sich die Radioaktivität in zwei oder drei Tagen über ein Gebiet von ungefähr 130 km² ausgebreitet, aber die höchste Strahlen-Dosisleistung war dann so gering, daß das Gebiet ohne Gefahr durchquert werden konnte.

Tabelle 9.108 Ausdehnungen und Dosisleistung verstrahlten Wassers nach der Unterwasserexplosion eines 20-kt-Atomsprengkörpers in Bikini

Zeit nach der Explosion (in Stunden)	Verstrahltes Gebiet (in km²)	Mittlerer Durchmesser (in km)	Maximale Dosisleistung (in r/h)
4	43,0	11,9	3,1
38	47,7	12,4	0,42
62	125,9	20,5	0,21
86	160,1	23,1	0,042
100	182,9	24,6	0,025
130	277	30,3	0,008
200	414	37	0,0004

9.109 Außer den oben erwähnten Faktoren trug nach dem *Baker*-Test zur Verringerung der Strahlung noch der Umstand bei, daß sich die Spaltungsprodukte auf dem Grund der Lagune abgesetzt hatten. Einige Tage nach der Explosion wurde das Material vom Grunde der Lagune untersucht, und es hatte den Anschein, als ob ein beträchtlicher Teil der Sprengkörperrückstände auf diese Weise dem Wasser entzogen worden sei. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, daß der größte Teil der Ablagerung im Verlauf einer Woche nach der Unterwasserexplosion erfolgt war und daß das vom radioaktiven Niederschlag getroffene Gebiet ungefähr 155 km² betrug. Obgleich die gesamte Radioaktivität am Grund der Lagune sehr stark war, war sie

doch so weit verteilt, daß sie für das Leben auf See keine Gefahr darstellte. Mehrere Monate später angestellte Untersuchungen ergaben, daß das verstrahlte Material sich kaum oder gar nicht ausgebreitet hatte. Aber das läßt sich vielleicht – wenigstens zum Teil – damit erklären, daß die Lagune von Bikini von Land eingeschlossen war.

Die technischen Grundlagen der Rückstandsstrahlung[1])

9.110 Die Mischung der Radioisotope, die die Spaltungsprodukte bilden, ist so kompliziert, daß eine mathematische Darstellung der Zerfallsrate, durch einzelne Halbwertszeiten ausgedrückt, praktisch unmöglich ist. Es wurde jedoch in Versuchen festgestellt, daß für einen Zeitraum von einigen Minuten bis 2 oder 3 Jahre nach der Explosion die *Gesamt*-Rate des radioaktiven Zerfalls (oder der Strahlungsemission) der Spaltungsprodukte mit ziemlicher Genauigkeit durch die verhältnismäßig einfache Formel ausgedrückt werden kann:

$$\text{Zerfallsrate} \quad A_1 t^{-1,2} \tag{9.110.1}$$

Hierbei ist t die Zeit nach der Bildung der Spaltungsprodukte, d. h. die Zeit nach der Explosion, und A_1 ist ein konstanter Faktor, der die Zerfallsrate je Zeiteinheit ausdrückt, die von der Menge der Spaltungsprodukte abhängt. Diese Gleichung kann auch bei geeigneten Werten für A_1 herangezogen werden, um die Emissionsrate der Gammastrahlen oder Betateilchen anzugeben. Bei jedem Zerfallsprozeß wird ein Betateilchen freigesetzt, aber die Gammastrahlenphotonen werden nur bei ungefähr der Hälfte des Spaltungsproduktzerfalls erzeugt; dieser Anteil hängt von der Zeit nach der Explosion ab.

9.111 Bei der Betrachtung der Strahlungsdosis (oder Dosisleistung) aus Spaltungsprodukten, z. B. im radioaktiven Niederschlag, sind die Gammastrahlen auf Grund ihrer großen Reichweite und Eindringtiefe von größerer Bedeutung als die Betateilchen, vorausgesetzt, daß das radioaktive Material nicht mit der Haut in Berührung kommt oder in den Körper gerät. Folglich können die Betastrahlen bei der Abschätzung der Abhängigkeit der Dosisleistung von der Zeit bei der Rückstandsstrahlung unberücksichtigt bleiben. Falls der Anteil des Spaltungsproduktzerfalls, der von der Gammastrahlung begleitet wird, und die Energie der Gammastrahlenphotonen im Verlauf der Zeit im wesentlichen konstant bleiben, dann würde die Dosisleistung, z. B. in Röntgen pro Stunde, unmittelbar zur Geschwindigkeit der Gammastrahlenemission in Beziehung stehen. Wie in Abschn. 9.34 erwähnt, ist das aber nicht der Fall. Die Gammastrahlen der frühen Stadien des Spaltungsproduktzerfalls haben durchschnittlich höhere Energien als in den späteren Stadien. Aber für die Zeiten, die praktisch von Interesse sind, angefangen bei einigen Stunden nach der Explosion, kann die mittlere Energie der Gammastrahlenphotonen als im wesentlichen konstant angesehen werden, und zwar beträgt sie ungefähr 0,7 MeV.

[1]) Die restlichen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

9.112 Obgleich der Anteil der Gammastrahlen mit der Zeit schwankt, liegt eine ziemlich gute Annäherung, die sich auf der Formel 9.110.1 aufbaut, darin, daß zur Zeit t nach der Explosion

$$\text{die Gammastrahlendosisleistung} = R_1 t^{-1,2} \text{ ist} \qquad (9.112.1);$$

dabei ist R_1 eine Konstante. Physikalisch gesehen, entspricht R_1 der (Bezugs-)Dosisleistung je Zeiteinheit. In der Regel wird die Zeit t in Stunden ausgedrückt; dann ist R_1 die Bezugsdosisleistung eine Stunde nach der Explosion. Wenn R_1 die Dosisleistung aus einer bestimmten Menge von Spaltungsprodukten zur Zeit t nach der Explosion ist, dann ist nach der Formel 9.112.1

$$\frac{R_t}{R_1} = t^{-1,2}; \qquad (9.112.2)$$

oder logarithmisch ausgedrückt:

$$\lg \frac{R_t}{R_1} = -1,2 \lg t. \qquad (9.112.3).$$

9.113 Aus der Formel 9.112.3 folgt, daß eine lg-lg-Darstellung von R_t/R_1 in Abhängigkeit von t eine gerade Linie mit einer Neigung von $-1,2$ ergeben müßte. Wenn $t = 1$ ist, d. h. 1 Stunde nach der Explosion, dann ist $R_t = R_1$, so daß $R_t/R_1 = 1$ ist; das ist der grundsätzliche Bezugspunkt, durch den die Neigungslinie $-1,2$ in Bild 9.8 gezogen ist.

9.114 Wenn die Zeit t in Stunden ausgedrückt ist, werden die Bestrahlungsdosisleistungen R_t und R_1 in Röntgen pro Stunde ausgedrückt. Dann ist die gesamte in Röntgen ausgedrückte Dosis, die aus einer gegebenen Menge Spaltungsprodukten in einer bestimmten Zeit nach der Explosion aufgenommen wird, leicht durch direkte Integration der Gleichung 9.112.2 zu erhalten. Zum Beispiel ist für den Zeitraum von t_a bis t_b Stunden nach der Explosion die

$$\text{Gesamtdosis} = R_1 \int_{t_a}^{t_b} t^{-1,2}\, dt = \frac{R_1}{0,2} \cdot \left[\frac{1}{t_a^{0,2}} - \frac{1}{t_b^{0,2}}\right] \qquad (9.114.1).$$

Deshalb kann, falls die Bezugsdosisleistung R_1 in Röntgen pro Stunde zum Zeitpunkt $t = 1$ bekannt ist, die (in Röntgen ausgedrückte) Gesamtdosis für alle beliebigen Zeiten errechnet werden.

9.115 Die Kurve in Bild 9.12 wird aus der Gleichung 9.114.1 abgeleitet; dabei wird t_a mit 0,0167 Stunden, d. h. 1 Minute angenommen; dies ist der Zeitpunkt, zu dem die Rückstandsstrahlung als begonnen angenommen wird. Bild 9.12 gibt die gesamte Strahlungsdosis an, die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt nach der Explosion aufgenommen wird, sofern die Bestrahlung die ganze Zeit hindurch anhält.

9.116 Die Gleichung 9.114.1 kann ferner herangezogen werden, um die Zeitdauer zu bestimmen, in der sich ein Mensch an einem durch Spaltungsprodukte ver-

strahlten Ort aufhalten kann, ohne mehr als eine bestimmte Strahlungsdosis aufzunehmen. In diesem Falle ist die Gesamtdosis spezifiziert; t_a ist die bekannte Zeit, in der das verstrahlte Gebiet betreten wird, und t_b ist die gesuchte Zahl, zu (oder vor) welcher der Bestrahlte es verlassen muß. Um dieses Problem mit Hilfe der Gleichung 9.114.1 zu lösen, muß man die Bezugsdosisleistung R_1 kennen. Diese kann man durch die Gleichung 9.112.2 erhalten, wenn man die Dosisleistung R_t zu einer beliebigen Zeit t nach der Explosion, z. B. bei Betreten des verstrahlten Gebiets, mißt. Die Ergebnisse können, wie in den Bildern 12.107 und 12.108, graphisch dargestellt werden.

9.117 Im Prinzip könnte die Gleichung 9.114.1 herangezogen werden, um die gesamte aus radioaktivem Niederschlag in einem verstrahlten Gebiet empfangene Dosis zu errechnen, vorausgesetzt, daß der *ganze* radioaktive Niederschlag in sehr kurzer Zeit ankommt. In Wirklichkeit können die radioaktiven Teilchen aber mehrere Stunden hindurch fallen, und wenn man die Geschwindigkeit nicht kennt, mit der die Spaltungsprodukte den Erdboden erreichen, ist es auch nicht möglich, eine sinnvolle Berechnung anzustellen. Wenn der radioaktive Niederschlag aber aufgehört hat, kann man die Gleichung 9.112.2 und 9.114.1 heranziehen, um verschiedene Strahlungsdosen zu berechnen, vorausgesetzt, es steht eine gemessene Dosisleistung zur Verfügung.

Die Aktivität der Spaltungsprodukte in Curie

9.118 Die Geschwindigkeit, mit der ein radioaktives Material zerfällt, d. h., die Geschwindigkeit, mit der es Betateilchen oder Gammastrahlen emittiert, wird im allgemeinen durch eine »Curie« genannte Einheit ausgedrückt. Das »Curie« ist eine Menge radioaktiven Materials, die in der Sekunde $3{,}7 \times 10^{10}$ Zerfallsprozesse durchmacht. Dieser Geschwindigkeitswert wurde gewählt, weil er (ungefähr) der Zerfallsgeschwindigkeit von 1 g Radium entspricht. Da die Aktivität der Spaltungsprodukte aus einer Kernexplosion sehr stark ist, ist es zweckmäßiger, die »Mega-Curie«-Einheit zu benutzen. Ein »Mega-Curie« ist 1 Million Curie und entspricht einer Geschwindigkeit von $3{,}7 \times 10^{16}$ Zerfallsprozessen je Sekunde.

9.119 Die Gammastrahlen sind, wie oben gesagt, biologisch im allgemeinen bedeutsamer als die Betateilchen aus Spaltungsprodukten. Folglich ist die Radioaktivi-

Tabelle 9.119 Gesamte Gammastrahlenaktivität der Spaltungsprodukte aus einer 1-Megatonnen-Explosion

Zeit nach der Explosion	Aktivität in Megacurie
1 Stunde	300000
1 Tag	6600
1 Woche	640
1 Monat	110
1 Jahr	5,5

tät der Spaltungsprodukte, in (Gamma-)Curie ausgedrückt, eher ein Maß für die Emissionsgeschwindigkeit von Gammastrahlenphotonen als für die Zerfallsgeschwindigkeit. Mit Hilfe der Gleichung 9.110.1 sind die gesamten Gammaaktivitäten aller Spaltungsprodukte aus einer 1-Megatonnen-Explosion für verschiedene Zeiten nach der Explosion errechnet worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9.119 wiedergegeben.

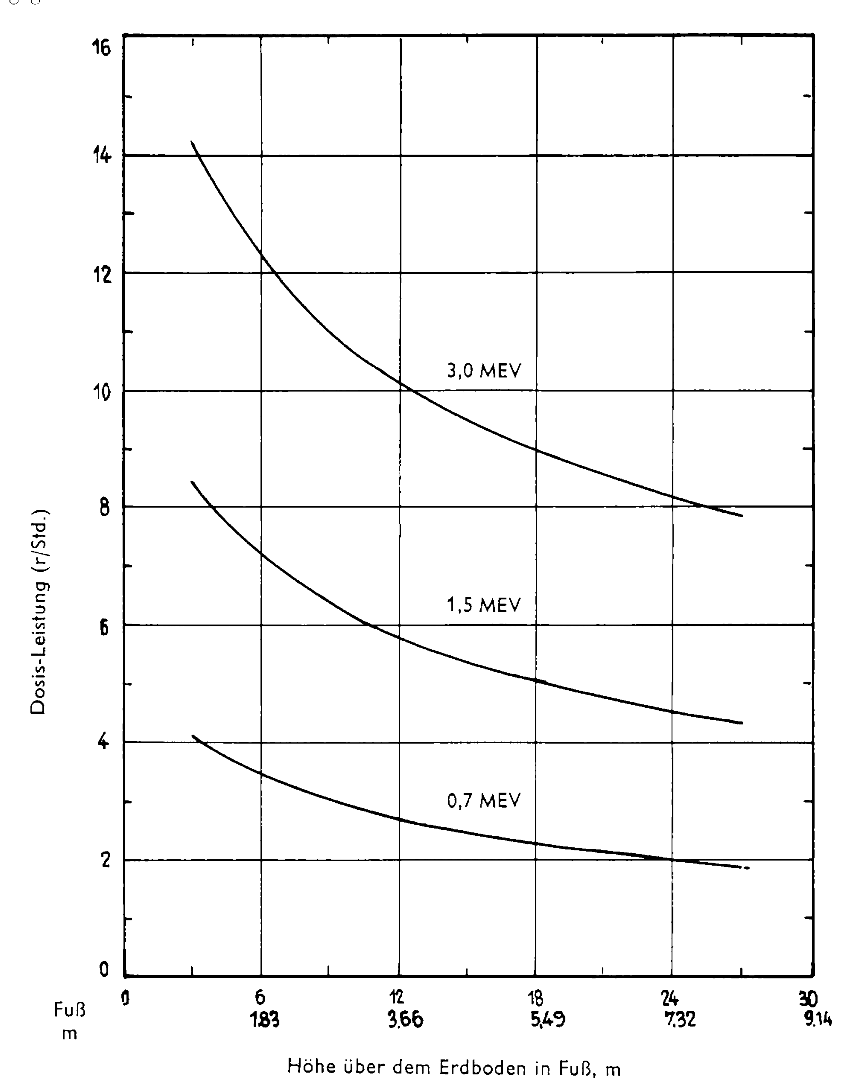


Bild 9.120 *Gammastrahlendosisleistung in der Nähe des Erdbodens bei gleichmäßiger Verstrahlung von 0,4 MC/km²*

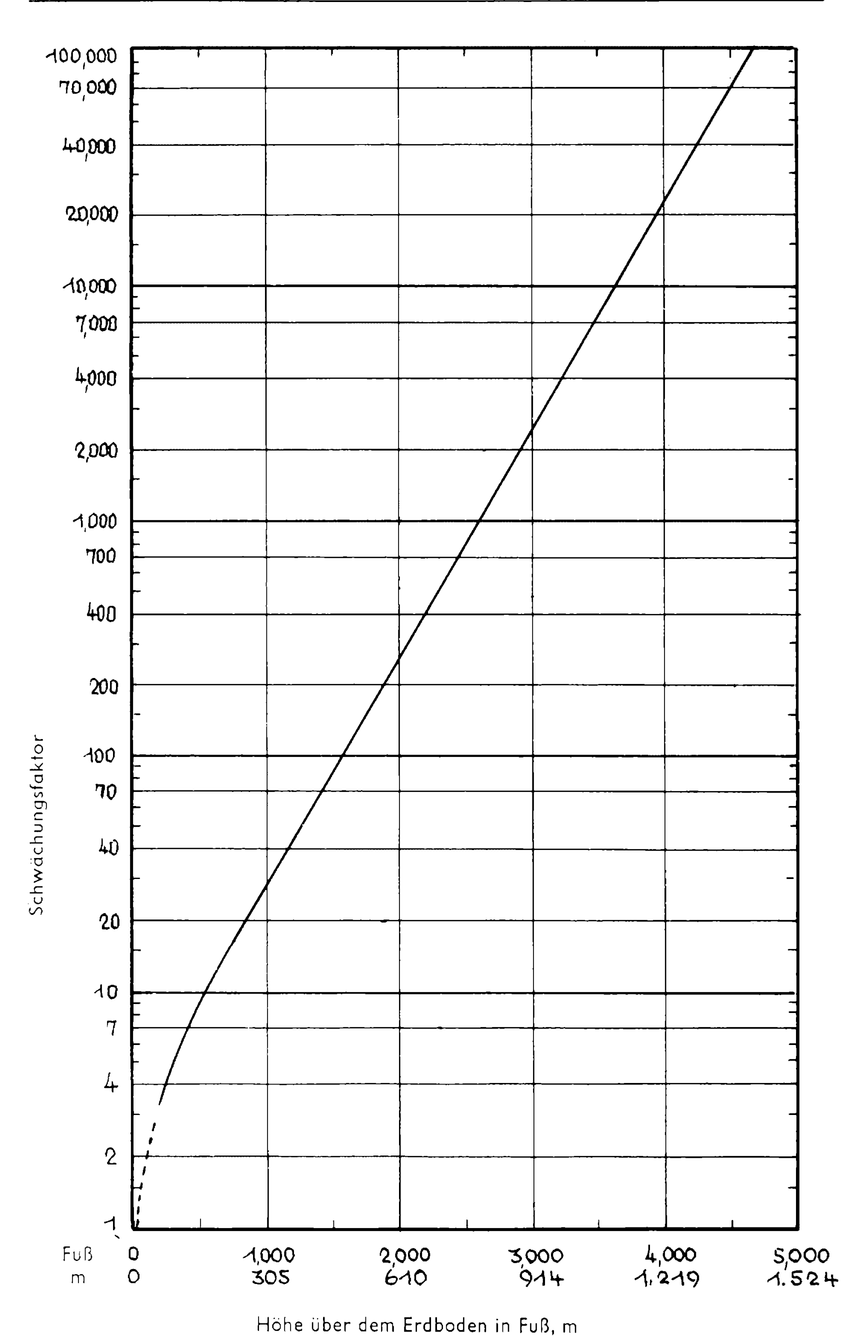


Bild 9.122 Höhenschwächungsfaktor bei Strahlung aus Spaltungsprodukten vom Erdboden aus

Die Strahlendosisleistung oberhalb verstrahlter Gebiete

9.120 Wenn ein Gebiet gleichmäßig mit radioaktivem Material bekannter Aktivität (in Curie) verstrahlt ist, kann man die Gammastrahlen-Dosisleistung in verschiedenen Höhen über dem Erdboden errechnen, vorausgesetzt, daß die durchschnittliche Energie der Gammastrahlenphotonen bekannt ist. Die Ergebnisse derartiger Berechnungen sind unter Zugrundelegung einer Verstrahlung von 0,39 MC pro km² für Gammastrahlen mit Energien von 0,7, 1,5 und 3,0 MeV in Bild 9.120 dargestellt. Die Kurve für 0,7 MeV gilt ungefähr für eine mit Spaltungsprodukten verstrahlte Fläche. Weicht die tatsächliche Verstrahlung von 0,39 MC/km² ab, dann müßten die Ordinaten des Bildes entsprechend multipliziert werden.

9.121 Zu bemerken ist, daß in den Berechnungen, auf denen das Bild 9.120 basiert, die Streuung der Gammastrahlen zurück zur Erde durch die Wechselwirkung von Sauerstoff und Stickstoff in der Luft außer acht gelassen wurde. Deshalb würde die gemessene Dosisleistung größer als die angegebene sein. Andererseits wurde aber angenommen, daß die Fläche, über die sich die Verstrahlung verteilt, vollkommen eben ist. Bei etwa unebenem Gelände ist die Dosisleistung in einer bestimmten Höhe geringer als bei einer ebenen Fläche. Praktisch wird die eine Abweichung durch die andere weitgehend aufgehoben, so daß Bild 9.120 einen verhältnismäßig guten Wert für die Dosisleistung in der Luft über einer unebenen Fläche gibt.

9.122 Die Dosisleistung in größeren Höhen über dem Erdboden, z. B. in einem Flugzeug, kann mit Hilfe von Bild 9.122 errechnet werden. Die Kurve gibt den Schwächungsfaktor für die Strahlung aus Spaltungsprodukten in Abhängigkeit von der Höhe an. Dieser Schwächungsfaktor gilt besonders für ein gleichmäßig verstrahltes Gebiet, das im Vergleich zu der Höhe des Flugzeugs groß ist. Ist die Dosisleistung in der Nähe des Erdbodens bekannt, dann erhält man den Wert für eine beliebige Höhe dadurch, daß man durch den Schwächungsfaktor für diese Höhe dividiert. Wird die Dosisleistung in einer bekannten Höhe gemessen, dann ergibt die Multiplikation mit dem Schwächungsfaktor die Dosisleistung in der Nähe des Erdbodens.

9.123 Man kann die Kurve in Bild 9.122 auch dazu heranziehen, die Dosisleistung und die Verstrahlungsstärke des Erdbodens aus den Werten zu ermitteln, die man durch eine Messung vom Flugzeug aus (s. Abschn. 12.77) erhalten hat. Nimmt man z. B. an, daß ein Strahlenmeßgerät, das vom Flugzeug aus in rund 300 m Höhe aufgehängt wird, eine Strahlendosisleistung von 0,24 Röntgen pro Stunde anzeigt, dann beträgt der Schwächungsfaktor für diese Höhe 30, und die Dosisleistung am Erdboden beträgt ungefähr $0{,}24 \times 30 = 7{,}2$ Röntgen pro Stunde. Aus Bild 9.120 geht hervor, daß bei einer Verstrahlung von 0,4 MC/km² die Dosisleistung in der Nähe des Erdbodens ungefähr 4 Röntgen pro Stunde beträgt. Deshalb beträgt im vorliegenden Fall die Verstrahlungsstärke ungefähr 0,7 MC/km².

9.124 Die Dosisleistung aus Gammastrahlen verschiedener Energien über dem Wasserspiegel bei gleichmäßiger Verstrahlung von 1,3 C/m³ ist in Bild 9.124a aufgezeigt. Die Kurve für 0,7 MeV Energie kann für die Verstrahlung durch Spaltungs-

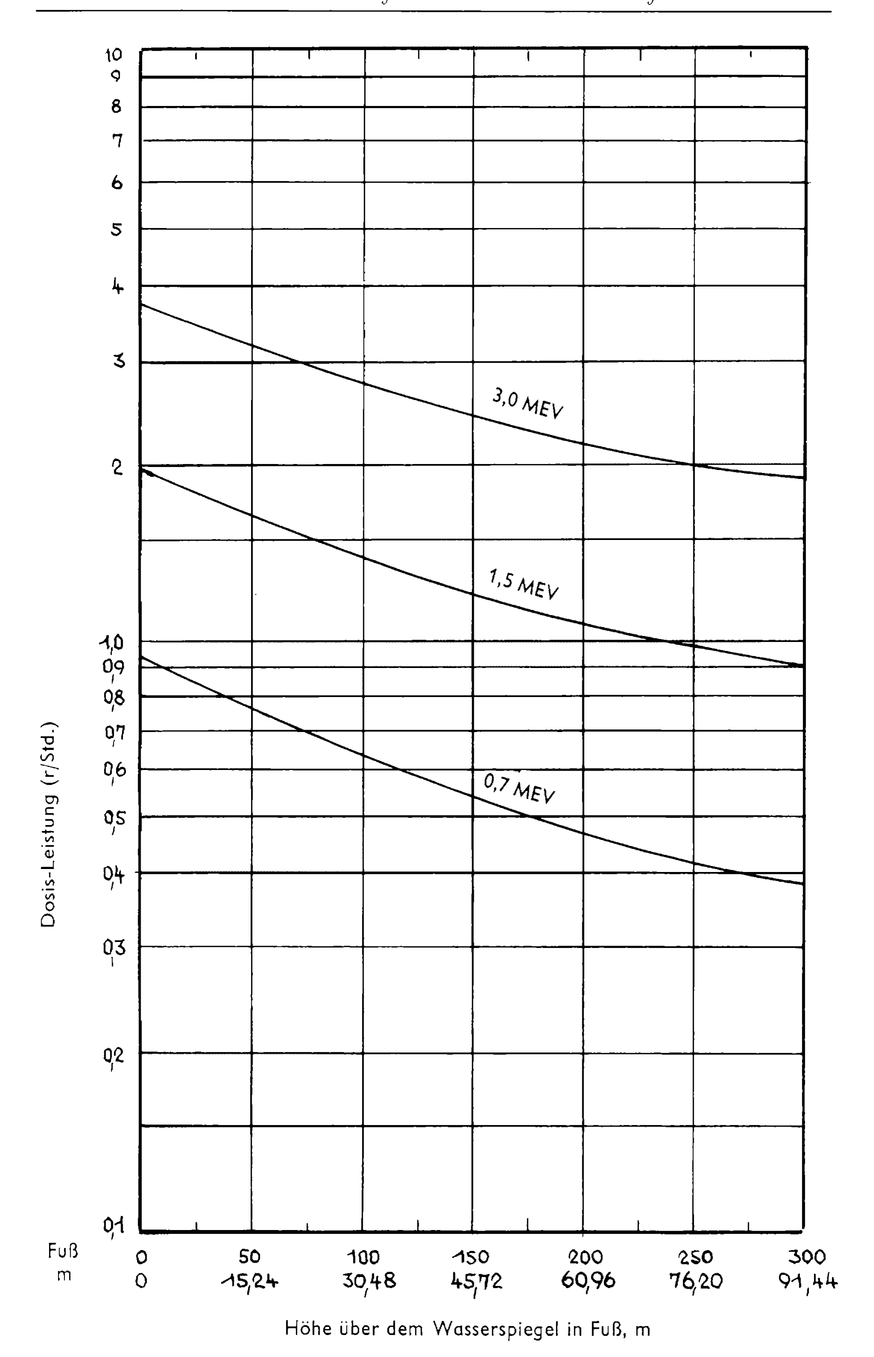


Bild 9.124a Gammastrahlen-Dosisleistung nahe Wasserspiegel

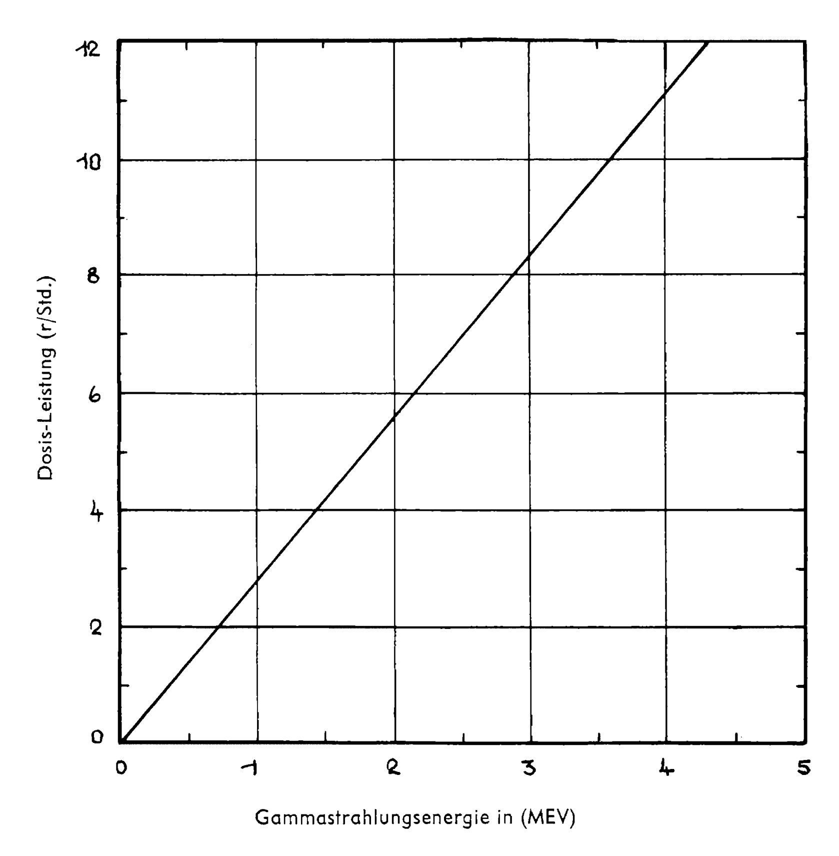


Bild 9.124b Gammastrahlen-Dosisleistung in einer großen Wassermenge bei gleichmäßiger Verstrahlung von 1,3 C/m³

produkte gelten. Die Dosisleistungen in verschiedener Höhe können mit Hilfe der Schwächungsfaktoren in Bild 9.122 errechnet werden. Die Dosisleistungen im Wasser selbst, wo die Verstrahlung als gleichmäßig verteilt angenommen wird, sind in Bild 9.124b als Funktion der Gammastrahlenenergie angegeben. Aus einer vom Flugzeug aus in bekannter Höhe durchgeführten Messung der Dosisleistung kann man die Verstrahlung des Wassers mit Hilfe von Bild 9.122 und 9.124a errechnen. Danach kann aus Bild 9.124b die Dosisleistung im Wasser errechnet werden.

Fallgeschwindigkeit der Teilchen

9.125 Ein wichtiger Gesichtspunkt des Problems des radioaktiven Niederschlags ist die theoretische Untersuchung der Teilchengröße als Funktion der Entfernung vom Explosionsgebiet. Es ist hier ein einfaches Verfahren angeführt, das ein – wenn

auch nur angenähertes – Bild gibt, das aber wohl qualitativ richtig ist. Zur Veranschaulichung wird angenommen, daß eine Kernwaffe mit hohem Explosionswert in der Nähe der Erdoberfläche explodiert. Obgleich die Teilchen aus der Atomwolke in allen Höhenlagen zwischen 18 km und 30 km niederfallen, wird zur Vereinfachung der Berechnungen angenommen, daß sie alle anfangen niederzufallen, wenn sie eine Höhe von durchschnittlich 24 km erreicht haben.

9.126 Die Fallgeschwindigkeit der kleinen Teilchen aus großen Höhen auf Grund der Schwerkraft kann mit Hilfe des Stokesschen Gesetzes wie folgt ungefähr berechnet werden:

$$\text{Fallgeschwindigkeit} = 0{,}11\ d^2\varrho \text{ Meter pro Stunde} \qquad (9.126.1)$$

Hierbei ist ϱ die Dichte des Teilchens in Gramm je Kubikzentimeter, und d ist sein Durchmesser in Mikron[1]). Diese Formel hat eine mittlere Gültigkeit für Teilchen von 5–300 Mikron, d. h. 5×10^{-4} bis 3×10^{-2} cm Durchmesser. Bei größeren Teilchen sind die Fallgeschwindigkeiten geringer als nach dem einfachen Stokesschen Gesetz. Angenommen, die Teilchen des radioaktiven Niederschlags haben die gleiche Dichte wie Sand, d. h. 2,6 g/cm³, dann sind die ungefähren Zeiten, die die Teilchen mit verschiedenem Durchmesser brauchen, um aus 24 km Höhe niederzusinken, nach der Berechnung aus Gleichung 9.126.1 in Tabelle 9.126 gegeben. Teilchen, deren Durchmesser kleiner ist als 5 Mikron, werden von der Brownschen Bewegung stark beeinflußt, die sich aus dem Zusammenstoß mit Luftmolekülen ergibt, so daß, wie schon festgestellt, einige von ihnen sehr lange Zeit hindurch in der Luft schweben. Die Fallgeschwindigkeit selbst größerer Teilchen wird von der Durchwirbelung der Luft beeinflußt.

Tabelle 9.126 Ungefähre Fallzeiten der Teilchen aus 24 km Höhe

Teilchendurchmesser (μ)	Fallzeit (in Stunden)
340	0,75
250	1,4
150	3,9
75	16
33	80
16	340
8	1400
5	3400

9.127 Wenn alle Teilchen von der gleichen Höhe aus niedersinken, können die Werte aus Tabelle 9.126 (oder aus der Gleichung 9.126.1) herangezogen werden, um die Veränderung der Teilchengröße des radioaktiven Niederschlags als Funktion der Entfernung vom Nullpunkt zu errechnen. Die tatsächliche Entfernung würde von der Höhe der Wolke abhängen, aus der die Teilchen fielen, da diese die Fallzeit be-

[1]) 1 Mikron oder 1 μ ist der millionste Teil (10^{-6}) eines Meters oder 1 Zehntausendstel (10^{-4}) Zentimeter.

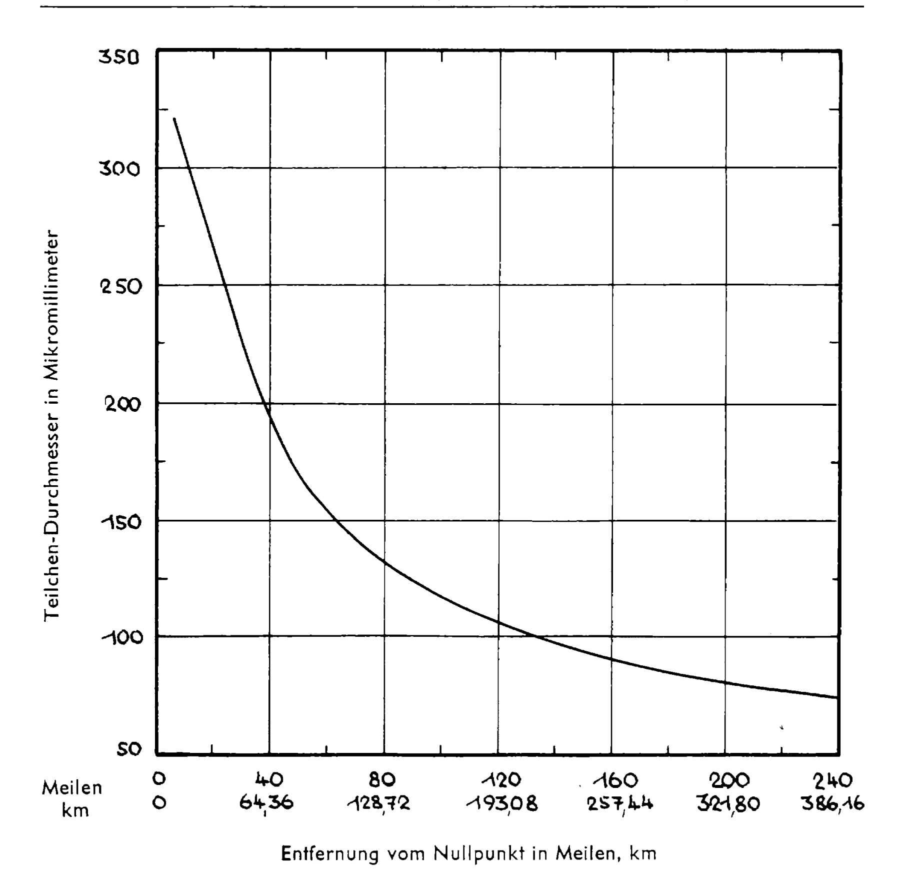


Bild 9.127 Von radioaktiven Niederschlagsteilchen verschiedener Größe zurückgelegte Entfernung. (Fall aus 24,4 km Höhe bei angenommener effektiver Windgeschwindigkeit von 24 km/h)

stimmt, sowie von der effektiven Windgeschwindigkeit. Trotzdem ist es möglich, eine verallgemeinerte Kurve wie in Bild 9.127 zu zeichnen; die Entfernung vom Nullpunkt entspricht der Fallzeit aus 24 km Höhe, multipliziert mit der durchschnittlichen (effektiven) Windgeschwindigkeit, die mit rund 24 km/h angenommen wird. Natürlich fallen Teilchen mit einem Durchmesser von mehr als 250 Mikron (0,025 cm) in verhältnismäßig geringer Entfernung vom Nullpunkt zur Erde. Kleinere Teilchen dagegen können viel größere Entfernungen zurücklegen, bevor sie als radioaktiver Niederschlag zur Erde kommen.

9.128 In der Praxis liegen die dem Bild 9.127 zugrundegelegten Verhältnisse nie vor. Wenn z. B. das Stokessche Gesetz nicht befolgt wird, steigen die Teilchen nicht alle bis zur gleichen Höhe in der Wolke, bevor sie zu fallen beginnen, und die Windgeschwindigkeit schwankt. Außerdem beeinflussen sowohl Unregelmäßigkeiten der

Form und gegenseitige Anziehung der kleineren Teilchen als auch die Durchwirbelung der Luft die Fallgeschwindigkeit. Folglich ist nach einer Kernexplosion die Veränderung der Teilchengröße mit der Entfernung nicht so gleichmäßig, wie in der vorstehenden Abhandlung angenommen. Es ist jedoch wahrscheinlich, daß die Kurve in Bild 9.127 ein gutes Gesamtbild über die Verteilung der Teilchengröße in bezug auf den Abstand zum Nullpunkt gibt.

9.129 Ungeachtet der Annäherungen bei der Ableitung der Kurve in Bild 9.127 hängen die Entfernungen, in denen unterschiedliche Teilchengrößen gefunden wurden, von der angenommenen effektiven Windgeschwindigkeit (24 km/h) und von der durchschnittlichen Höhe, aus der der Annahme gemäß die Teilchen herabfallen (24 km) ab. Bei einer Explosion mit geringerem Explosionswert steigt die Wolke nicht so hoch, und deshalb erreichen die Teilchen jeder gegebenen Größe die Erde schon früher. Die jeweiligen Entfernungen vom Nullpunkt sind dann bei gleicher Windgeschwindigkeit kleiner, als in Bild 9.127 angegeben. Dagegen führt eine höhere effektive Windgeschwindigkeit zu einer Vergrößerung der Entfernung, die die Teilchen jeder Größe zurücklegen, bevor sie den Erdboden erreichen.

9.130 In bezug auf die Verstrahlung ist außer der Fallgeschwindigkeit auch das Flächengebiet der Teilchen von Bedeutung. Viele der nach Versuchsexplosionen aufgesammelten Teilchen des radioaktiven Niederschlags haben eine ziemlich gleichmäßige Verteilung der Radioaktivität bewiesen, aber oft wurde nur an der Oberfläche Radioaktivität festgestellt (Abschn. 2.21). Zur Vereinfachung der nachstehenden Abhandlung wird jedoch angenommen, daß es sich um die letztgenannte Art von Verstrahlung handelt und daß die Dichte der radioaktiven Schicht immer die gleiche ist. Die gesamte Radioaktivität in den Teilchen von gegebener Größe hängt dann von dem Teil des gesamten Gebietes ab, in dem diese Größenkategorie vorkommt. Um Berechnungen anstellen zu können, muß man die Größenverteilung der radioaktiven Niederschlagsteilchen kennen, d. h., den Anteil jeder Größenkategorie. Mangels genauerer Unterlagen kann als ungefährer Anhaltspunkt angenommen werden, daß die Verteilung die gleiche ist wie in dem Boden, über dem die Explosion erfolgt.

9.131 Auf Grund der vorstehenden Annahmen sind die Ergebnisse in Tabelle 9.131 gewonnen worden. Den vier Größenkategorien der Teilchen in der 1. Spalte von Tabelle 9.126 sind die Durchmesser zugrunde gelegt, und die Zeiten des radioaktiven Niederschlags entsprechen den Fallzeiten aus 24 km Höhe, wie sie in Spalte 2 dieser Tabelle angegeben sind. Die Werte in Tabelle 9.131 zeigen, daß 16 Stunden nach der Explosion sich ungefähr 50% der gesamten Spaltungsprodukt-Aktivität auf der Erde abgelagert haben. Während dieser Zeit haben die Teilchen ungefähr 386 km in Mitwindrichtung zurückgelegt, wenn die effektive Windgeschwindigkeit 24 km/h beträgt:

9.132 Die Ergebnisse in der letzten Spalte der Tabelle 9.131 geben den Prozentsatz der Anfangsstrahlung der Spaltungsprodukte in den einzelnen Größenkategorien der Teilchen wieder. Mit anderen Worten: der natürliche radioaktive Zerfall während des Aufsteigens mit der Atomwolke und während des Absinkens mit dem radio-

Tabelle 9.131 Prozentsatz des strahlenden Materials, der sich aus einer Atomwolke aus 24 km Höhe ablagert

Teilchendurchmesser (Mikron)	Ankunftszeit (Stunden)	Prozentsatz der abgelagerten Aktivität
340	bis 0,75	3,8
340–250	0,75– 1,4	12,6
250–150	1,4 – 3,9	14,5
150– 75	3,9 –16	18,1

aktiven Niederschlag ist nicht berücksichtigt worden. Aber wegen dieses Zerfalls wird das am Erdboden abgelagerte Material mit zunehmenden Zeiten nach der Explosion immer weniger aktiv. So gibt Tabelle 9.131 an, daß in der Zeit von 3,9 bis 16 Stunden nach der Explosion ungefähr 18% der Spaltungsprodukte die Erdoberfläche erreicht haben. Wenn man den natürlichen Zerfall aber berücksichtigt, ist es wahrscheinlich, daß dieser weniger als 0,1% der ursprünglichen Radioaktivität der Atomwolke ausmachen würde.

Der voraussichtliche Weg des radioaktiven Niederschlags

9.133 Verschiedene Verfahren von verschiedener Genauigkeit (und entsprechender Kompliziertheit) sind vorgeschlagen worden, um den voraussichtlichen Weg des radioaktiven Niederschlags auf dem Erdboden nach einer Kernexplosion vorauszusagen. Eines der einfachsten Verfahren ist nachstehend beschrieben[1]). Obgleich die Ergebnisse vielleicht nicht so genau sind wie bei anderen Verfahren, hat das hier aufgezeigte Verfahren doch den großen Vorteil, daß es kürzere Zeit in Anspruch nimmt; es kann sogar unter Notstandsbedingungen durchgeführt werden. Zu den hierzu benötigten Grunddaten gehört die Kenntnis (oder Voraussage) der mittleren Windgeschwindigkeit und -richtung in einer Reihe von 1,5 km dicken Luftschichten von der Erdoberfläche bis zum oberen Rand der Atomwolke.

9.134 Wenn man in Bild 9.134 vom Punkt 0 als Nullpunkt ausgeht, wird ein Vektor OA gezogen, der (in km/h) die Geschwindigkeit und Richtung des Windes in Höhe der ersten 1,5 km vom Erdboden angibt. Dann folgen die Vektoren AB, BC, ..., GH für die nächsten Luftschichten bis zur Beobachtungsgrenze, d. h. bis zum obersten Rande der Wolke, im vorliegenden Fall $8 \times 1{,}5 =$ rund 12 km. Die Linie OH stellt also die örtliche Lage der Teilchen dar, die zu verschiedenen Zeiten aus rund 12 km Höhe fallen. Die größeren Teilchen findet man bald nach der Explosion dicht am Nullpunkt, wogegen die kleineren Teilchen zu späteren Zeitpunkten in größeren Entfernungen niederfallen. Die Linie OG bezeichnet die örtliche Lage der Teilchen, die aus einer Höhe von rund 10,5 km herunterfallen, da sie dem Wind, der durch Vektor GH dargestellt wird, nicht ausgesetzt sind. Ähnlich stellt OF die

[1]) US-Handelsministerium, Rundschreiben des Wetteramtes 16–54.

örtliche Lage der Teilchen dar, die bei etwa 9 km zu fallen beginnen, usw. Der durchschnittliche Wind in Höhen bis zu 12 km ist gleich der Länge von OH, dividiert durch die Anzahl der 1,5-km-Schichten, d. h. im vorliegenden Fall 8.

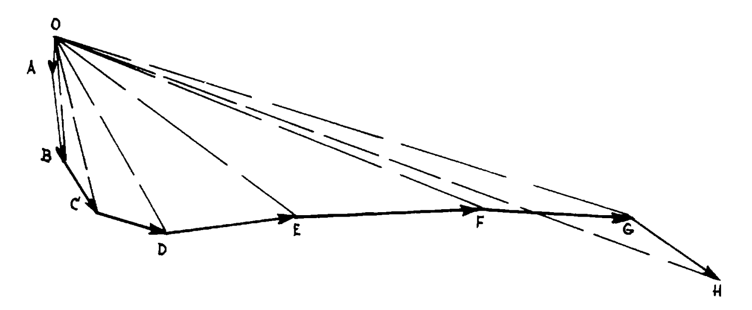


Bild 9.134 Voraussichtlicher Weg des radioaktiven Niederschlages entsprechend dem Windverlauf

9.135 Das von der Linie OH eingeschlossene Gebiet und die verschiedenen Vektoren können also so angesehen werden, als lieferten sie einen ungefähren Hinweis auf die Richtung des radioaktiven Niederschlags im Hinblick auf den Nullpunkt. Außer der Wirkung des Windes bewirkt noch eine gewisse Verteilung der Teilchen in der Atmosphäre eine Ausbreitung nach allen Richtungen um das vom Windvektor abgeleitete, idealisierte Gebiet herum.

9.136 Obgleich Bild 9.134 einen allgemeinen Begriff von den Umrissen des radioaktiven Niederschlagsgebietes gibt, deutet es das gesamte Ausmaß dennoch nicht an. Falls, wie im oben erwähnten Fall, die Windvektoren, in km/h ausgedrückt, in Höhen von 1,5 km gezogen werden, dann ist OH die Entfernung, die von den aus 12 km Höhe in acht Stunden niederfallenden Teilchen zurückgelegt wird. Ähnlich ist OG die Entfernung, welche die aus rund 10,5 km Höhe in 7 Stunden niedersinkenden Teilchen wandern. Also ist $OAB \ldots HO$ größenmäßig ungefähr das Gebiet, in dem Teilchen von 75 Mikron Durchmesser (oder mehr) zur Erde fallen. Derartige Teilchen fallen mit einer Geschwindigkeit von mindestens 1,5 km/h. Kleinere Teilchen fallen langsamer und sind auch außerhalb des dargestellten Gebietes zu finden. Die Stellen am Erdboden, an denen Teilchen aus verschiedenen Höhen niederfallen, haben jedoch die gleiche Richtung wie vorher. So treten Teilchen mit einem Durchmesser von weniger als 75 Mikron, die aus rund 12 km Höhe herunterkommen, in der Verlängerung der Linie OH auf, und die aus rund 10,5 km Höhe fallenden Teilchen treten in der Verlängerung der Linie OG auf. Deshalb ist die Gesamtform des Niederschlagsgebietes der in Bild 9.134 ähnlich, obgleich sie sich über ein größeres Gebiet erstreckt.

9.137 Das vorstehend beschriebene Verfahren hinsichtlich des möglichen Gebietes radioaktiven Niederschlags gibt natürlich nur eine ungefähre Richtlinie. In Wirklichkeit kennt man die Größenverteilung der Teilchen nicht, und die Höhe der

Atomwolke, aus der die Teilchen fallen, ist ungewiß. Außerdem können sich Windgeschwindigkeit und -richtung mit der Zeit ändern, und die Wirkung einer starken Windveränderung in dünnen Schichten ist außer acht gelassen worden. Überdies ist angenommen worden, daß der Windverlauf in dem Bild 9.134 für das ganze Gebiet stärkerer Verstrahlung gilt, das sich bis auf 320 km vom Nullpunkt erstrecken kann.

Wenn zur Zeit der Explosion (oder bald danach) Regen oder Schnee fällt, so verändert dies die durch den radioaktiven Niederschlag geschaffene Situation ebenfalls, weil sich viele radioaktive Teilchen an die Tropfen heften und aus verschiedenen Höhen mit den für Regen oder Schnee charakteristischen Geschwindigkeiten niederfallen.

9.138 Wenn zur Zeit der Explosion oder um diesen Zeitpunkt herum über die Winde in größeren Höhen keine Informationen vorliegen, kann man das allgemein an dem betreffenden Ort zu einer bestimmten Jahreszeit zu erwartende Gesamtgebiet verwenden. Diese Information, die sich auf langfristige Beobachtungen von Wetterstationen aufbaut, kann vielleicht durch visuelle Schätzungen des Wolkenzuges in verschiedenen Höhen ergänzt werden. Es muß betont werden, daß die Niederschlagsgebiete, die ausschließlich nach den Bodenwinden geschätzt werden, völlig irreführend sein können.

KAPITEL X

Der weltweite radioaktive Niederschlag und die langfristige Rückstandsstrahlung

Der örtliche und der weltweite radioaktive Niederschlag

Einleitung

10.1 Der im vorhergehenden Kapitel behandelte radioaktive Niederschlag von Atomsprengkörperresten kann als Niederschlag »örtlichen« Charakters bezeichnet werden. Er besteht in der Hauptsache aus den größeren Teilchen, die auf Grund der Schwerkraft im Verlauf von Stunden zur Erde niedersinken. Die zurückgelegten Entfernungen sind verhältnismäßig gering und betragen selbst bei stärksten Explosionen nur wenige hundert Kilometer vom Nullpunkt in Mitwindrichtung. Die Gefahr des örtlichen radioaktiven Niederschlags beruht in erster Linie auf Kernstrahlungen aus radioaktiven Stoffen außerhalb des menschlichen Körpers. Während der ersten Tage oder Wochen nach der Explosion kann die Strahlungsintensität so stark sein, daß sie für ungeschützte Personen eine Gefahr darstellt. Die Strahlungsintensität nimmt mit der Zeit aber schnell ab und stellt nach einigen Wochen – abgesehen von Gebieten starker Verstrahlung durch Anfangsstrahlen – keine ernste Bedrohung mehr da. Aber wie wir bereits gesehen haben, vermindert sich die Radioaktivität im Laufe der Zeit immer langsamer, so daß sie sogar noch nach mehreren Jahren nachweisbar ist.

10.2 Es gibt noch eine andere Form des radioaktiven Niederschlags, die sich viel stärker ausbreitet als der örtliche Niederschlag. Es handelt sich hierbei um den Teil der Sprengkörperreste, der aus sehr feinen Stoffen besteht, welche eine lange Zeit, die von Tagen bis zu Jahren dauern kann, in der Luft schwebend verbleiben. Diese feinen Teilchen können vom Winde über ausgedehnte Gebiete getragen werden und sich schließlich auf Teilen der Erde ablagern, die weit vom Explosionspunkt entfernt liegen. Der Niederschlag dieser feinen Sprengkörperreste wird der »weltweite radioaktive Niederschlag« genannt. Man sollte aber aus diesem Ausdruck weder darauf schließen, daß sich dieses feine Material nicht auch in Gebieten nahe dem Explosionspunkt ablagert, noch daß es sich über die ganze Erde gleichmäßig verteilt. Die Art der Verteilung wird weiter unten erörtert; im Augenblick interessiert nur, daß der zur Diskussion stehende Niederschlag sich sehr viel weiter als der örtliche ausbreitet.

10.3 Wenn jemand der Strahlung aus dem örtlichen radioaktiven Niederschlag übermäßig stark ausgesetzt wäre, könnte dies zu Schädigungen führen, die sich einige Tage (oder Wochen) nach der Explosion bemerkbar machen. Dies nennt man »kurzfristige« Wirkungen. Außerdem gibt es die »langfristigen« (oder verzögerten) Wir-

kungen, die vielleicht nie oder erst Jahre nach der Explosion in Erscheinung treten. Die Kernstrahlung aus dem kurzfristigen (oder örtlichen) radioaktiven Niederschlag sowie die Strahlung, die in den folgenden Monaten oder Jahren bei viel geringeren Dosisleistungen – und zwar aus dem örtlichen und dem weltweiten radioaktiven Niederschlag – aufgenommen werden, dürften zur Wahrscheinlichkeit dieser verzögerten Wirkungen beitragen. Eine derartige Strahlung kann aus Stoffen innerhalb und auch außerhalb des Körpers herrühren.

10.4 Eine der langfristigen Wirkungen kann sich in genetischen Veränderungen zeigen, welche dadurch entstehen, daß die Zellen, die Erbanlagen von einer Generation auf die nächste übertragen, Kernstrahlen ausgesetzt werden. Diese Wirkung der Rückstands-(und anderer)Strahlungen wird in Kap. XI eingehend untersucht. Die hier behandelten langfristigen Wirkungen können auftreten, wenn die menschlichen Zellgewebe einer Bestrahlung aus Stoffen ausgesetzt werden, die sich lange Zeit im Körper angesammelt haben. In diesem Zusammenhang ist der weltweite radioaktive Niederschlag von Interesse.

Der radioaktive Niederschlag aus der Troposphäre

10.5 Schon aus früheren Kapiteln dieses Buches ging hervor, daß der örtliche radioaktive Niederschlag nur dann von Bedeutung ist, wenn die Kernexplosion an oder nahe (also dicht über oder unter) der Erdoberfläche erfolgt, so daß eine große Menge Staub in der Atomwolke hochgetragen wird. Dagegen können alle Arten von Kernexplosionen den weltweiten radioaktiven Niederschlag verursachen, sofern sie nicht so tief unter der Erde erfolgen, daß der Feuerball nicht zum Durchbruch kommt und es somit keine Atomwolke gibt. Aber bei dem weltweiten radioaktiven Niederschlag muß man zwischen Explosionen geringem und solchen mit hohem Explosionswert unterscheiden. Es wird angenommen, daß die Explosion im unteren Teil der Troposphäre erfolgt. (Die Troposphäre ist der Teil der Atmosphäre, der je nach den vorherrschenden klimatischen Bedingungen bis etwa 9000–15000 m Höhe reicht.) Dann dürfte sich die Atomwolke aus einer Kernexplosion im Kilotonnenbereich im allgemeinen nicht über den oberen Rand der Troposphäre ausdehnen (s. Abschn. 2.14 und 2.15). Folglich bleiben bei solchen Explosionen nahezu alle in den Sprengkörperresten enthaltenen feinen Teilchen in der Troposphäre, bis sie sich schließlich ablagern.

10.6 Der Vorgang der Ablagerung der feinen Niederschlagsteilchen aus der Troposphäre ist kompliziert, weil außer einfachem Absinken auf Grund der Schwerkraft noch verschiedene andere Prozesse damit verbunden sind. Der bedeutendste dieser Prozesse ist wohl die auswaschende Wirkung des Regens oder anderer Formen feuchten Niederschlags. Die zu einem beliebigen Zeitpunkt aus der Troposphäre ausgeschiedene Menge radioaktiver Substanzen ist offenbar proportional der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Menge. Deshalb ist die Zeit, in der die Hälfte der Substanzmenge sich ablagert – die sog. Halbwertszeit – eine Kenngröße. Für den radioaktiven

Niederschlag aus der Troposphäre beträgt diese Halbwertszeit einige Wochen, so daß der Sprengkörperstaub nicht sehr lange in der Troposphäre verbleibt.

10.7 Während der feine Staub in der Troposphäre schwebt, wird der größere Teil des Materials vom Wind in große Höhen getragen. Im allgemeinen ist der Windverlauf so, daß der Staub schnell in östlicher Richtung fortgetragen wird und in 4–7 Wochen einen Kreislauf um den ganzen Erdball vollbringt. Die Ausbreitung der radioaktiven Wolke in nördlicher und südlicher Richtung erfolgt verhältnismäßig langsam; dadurch lagert sich der größte Teil des feinen radioaktiven Niederschlags aus der Troposphäre in dem kurzen Zeitraum von einigen Wochen in einem ziemlich schmalen Streifen ab, der die Erde in der Höhe der Kernexplosion umschließt.

Der radioaktive Niederschlag aus der Stratosphäre

10.8 Bei Explosionen mit hohem Explosionswert, also bei solchen im Megatonnenbereich, wird nahezu aller Sprengkörperstaub über die Troposphäre hinaus in die Stratosphäre geraten. Bei einer Boden- oder Untererdexplosion lagern sich die größeren Teilchen örtlich ab. Es kann angenommen werden, daß bei allen Explosionsarten die sehr feinen Teilchen im Staub der Stratosphäre bleiben, der sich über die ganze Erde ausbreitet. Da diese Teilchen so klein sind und es in derartigen Höhen keine Wolken und keinen Regen gibt, senken sie sich nur sehr langsam zur Erde. Schätzungen auf Grund der zur Zeit nur begrenzt zur Verfügung stehenden Informationen deuten darauf hin, daß jährlich ungefähr 10% dieses in der Stratosphäre zurückgehaltenen Staubes zur Erde niederfallen; die entsprechende Halbwertszeit beträgt also ungefähr 7 Jahre. Die Sprengkörperreste breiten sich während ihres langen Verbleibens in der Stratosphäre langsam, aber weitgehend aus, so daß sie an jedem beliebigen Punkt des Erdballes in die Troposphäre gelangen können. Ist der feine Staub erst einmal in der Troposphäre, dann verhält er sich vermutlich genauso wie der Staub aus einer Explosion mit geringem Explosionswert, der zu Anfang in diesem Teil der Atmosphäre verbleibt und dann durch Regen oder Schnee ziemlich schnell zur Erde gelangt.

10.9 Ein bedeutendes Merkmal dieses weltweiten radioaktiven Niederschlags aus der Stratosphäre ist die Tatsache, daß die radioaktiven Teilchen in der Stratosphäre zurückgehalten werden und nur ein kleiner Bruchteil ununterbrochen zur Erdoberfläche niederrieselt. Solange der Staub in der Stratosphäre zurückgehalten wird, stellt er keine unmittelbare Gefahr dar. Während dieser Zeit schwindet nämlich der größte Teil der kurzlebigen Radioaktivität, und ein Teil der längerlebigen Radioaktivität wird merklich verringert. So besteht der weltweite radioaktive Niederschlag aus der Stratosphäre aus einer langsamen, ununterbrochenen Ablagerung radioaktiver Substanzen über der ganzen Erdoberfläche; die Stärke der Ablagerung hängt von der Gesamtmenge des noch in der Stratosphäre befindlichen Sprengkörperstaubs ab.

Die Gefahr der langfristigen Rückstandsstrahlung

Einleitung

10.10 Die bedeutendsten der Spaltungsprodukte, die eine mögliche langfristige Gefahr bei Versuchen mit Kernwaffen im Frieden oder bei Anwendung in einem Kriege darstellen, sind wahrscheinlich die radioaktiven Isotope Caesium-137 und Strontium-90. Da diese beiden Isotope unter den Spaltungsprodukten ziemlich reichlich vorkommen und relativ kurze Halbwertszeiten haben, machen sie bei jedem weltweiten radioaktiven Niederschlag einen hohen Prozentsatz aus. Natürlich ist die Aktivität dieser Isotope zu späteren Zeitpunkten im örtlichen radioaktiven Niederschlag aus einer Boden- oder Untererdexplosion bemerkenswert stärker als bei dem weltweiten radioaktiven Niederschlag aus einer Kernexplosion.

Caesium-137

10.11 Caesium hat eine radioaktive Halbwertszeit von 30 Jahren und ist bei radioaktivem Niederschlag, der älter als ein Jahr ist, von besonderer Bedeutung, weil es den Hauptbestandteil darstellt, dessen radioaktiver Zerfall von einer Gammastrahlenemission begleitet ist.

Die chemischen Eigenschaften des Caesiums sind ähnlich wie die von Kalium. Die Verbindungen dieser Elemente sind im allgemeinen löslicher als die entsprechenden Verbindungen von Strontium und Kalzium (s. Abschn. 10.17), und die Einzelheiten der Übertragung dieser beiden Elementenpaare vom Erdboden auf den menschlichen Körper sind ganz verschieden.

10.12 Caesium ist ein in der Natur verhältnismäßig selten vorkommendes Element, und der Körper enthält normalerweise nur geringe Spuren davon. Infolgedessen sind die biochemischen Vorgänge bei Caesium nicht so weitgehend untersucht worden wie die häufiger vorkommender Elemente. Es wurde jedoch festgestellt, daß Caesium-137 sich in lebenden Zellen auf die gleiche Weise wie Kalium verteilt, so daß es zum größten Teil in den Muskeln zu finden ist. Die Zeit, die für normale biologische Prozesse nötig ist, um die Menge des Caesiums im Körper auf die Hälfte zu reduzieren, d. h. die biologische Halbwertszeit, wird gegenwärtig auf Grund eines Versuchs an verschiedenen Menschen (s. Abschn. 11.110) auf 140 Tage geschätzt. Wegen der Durchdringfähigkeit der beim Zerfall von Caesium-137 auftretenden Gammastrahlen wird die Strahlung mehr oder weniger gleichmäßig auf alle Körperteile verteilt. Obgleich beim radioaktiven Zerfall von Caesium-137 Gammastrahlen emittiert werden, deuten die verhältnismäßig kurze Zeit des Verbleibens und die Tatsache, daß sich der größte Teil des Caesiums an weniger empfindlichen Stellen des Körpers ablagert, darauf hin, daß bei gleicher Menge radioaktiven Niederschlags aus der Stratosphäre die Rückstandsstrahlung aus Caesium-137 eine geringere Krankheitsgefahr darstellt als aus Strontium-90.

Strontium-90

10.13 Wir wollen die Aufmerksamkeit nun auf einen Vorgang richten, der vermutlich eine schwere und lang anhaltende Gefahr bedeutet. Auf Strontium-90 entfällt wegen seiner verhältnismäßig langen radioaktiven Halbwertszeit von 28 Jahren und wegen der großen Menge, in der es bei der Kernspaltung auftritt, ein bedeutender Teil der gesamten Aktivität der mehrere Jahre alten Spaltungsprodukte. So ist festzustellen, daß sogar radioaktive Substanzen, die mehrere Jahre in der Stratosphäre zurückgehalten wurden, einen hohen Prozentsatz an radioaktivem Strontium-90 enthalten.

10.14 Strontium ist, chemisch gesehen, dem Kalzium ähnlich, welches ein wichtiges Element für das Leben von Pflanzen und Tieren ist; der Körper eines erwachsenen Menschen z. B. enthält über 1 kg Kalzium, und zwar hauptsächlich in den Knochen. Infolge der chemischen Gleichartigkeit nimmt das in den Körper gelangende Strontium einen ähnlichen Weg wie das Kalzium; es ist deshalb fast ausschließlich im Knochenbau festzustellen, aus dem es nur sehr langsam wieder ausgeschieden wird. Man schätzt die Halbwertszeit von Strontium im menschlichen Körper auf ungefähr 10 Jahre.

10.15 Die Wahrscheinlichkeit schwerer pathologischer Veränderungen im menschlichen Körper auf Grund der Wirkungen der in den Körper gelangten aktiven Substanzen hängt von der Intensität und Energie der Radioaktivität und von der Zeitdauer ab, während der die Strahlenquelle im Körper verbleibt (s. Abschn. 11.102ff). Obgleich Strontium-90 nur Betateilchen (und keine Gammastrahlen) emittiert, kann eine genügende Menge dieses Isotops zu Schädigungen führen, denn wenn es erst einmal in den Knochenbau gelangt ist, bleibt es lange Zeit darin bestehen. Auf Grund von Tierversuchen glaubt man, daß die pathologischen Auswirkungen schädlicher Mengen von Strontium-90 zu Anaemie, Knochennekrose, Krebs und möglicherweise auch Leukaemie führen können. Wegen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Strontium-90, d. h. wegen seiner langen Halbwertszeit und seiner Ähnlichkeit mit Kalzium, in Verbindungen mit der Natur der pathologischen Veränderungen, die sich durch Ansammlung radioaktiver Substanzen im Knochenbau ergeben können, ist, soweit man weiß, Strontium-90 das bedeutsamste Isotop als mögliche Ursache langfristiger schädlicher Wirkungen des radioaktiven Niederschlages.

10.16 Die durch Strontium-90 verursachten genetischen Wirkungen sind verhältnismäßig unbedeutend. Die Betateilchen dieses Isotops im Knochenbau dringen auf Grund ihrer sehr kurzen Reichweite im Körper nicht bis zu den Fortpflanzungsorganen vor. Außerdem ist die Intensität der von den Betateilchen erzeugten Bremsstrahlung gering; und schließlich ist die Menge Strontium-90, die in weichen Geweben vorhanden ist, von denen aus die Betateilchen die Fortpflanzungsorgane erreichen könnten, nur klein und kann in diesem Zusammenhang unberücksichtigt bleiben.

Übertragung von Strontium-90 vom Erdboden in den menschlichen Körper

10.17 Wenn der größte Teil des Strontiums-90 schließlich mit dem Regen oder Schnee zur Erde gelangt, dringt es in den Erdboden und auf dem Weg über die Pflanzen auch in den menschlichen Körper ein. Es könnte zunächst den Anschein haben, als ob das Verhältnis des Strontiums zum Kalzium im Menschen ähnlich wie im Erdboden werden könnte, von dem der Mensch seine Nahrung erhält. Aber glücklicherweise erfolgt ein Zusammenwirken verschiedener Vorgänge in der Kette der biologischen Übertragungen dieser Elemente vom Erdboden bis zum menschlichen Körper, wodurch die im Menschen abgelagerte Menge von Strontium-90 verringert wird.

Diese Übertragungsvorgänge gliedern sich in folgende Stadien: 1. Weg vom Boden zur Pflanze, 2. Weg von der Pflanze zum Tier, 3. Weg vom Tier zum Menschen. Eine gewisse Menge Kalzium (und Strontium) nimmt der Mensch unmittelbar durch Pflanzen, z. B. Obst und Gemüse auf; aber diese Menge ist, wie wir gleich sehen werden, nicht sehr groß. Versuche haben erwiesen, daß in jedem der drei aufgeführten Stadien eine natürliche Verschiebung zugunsten des Kalziums und zum Nachteil des Strontiums erfolgt, so daß die Verhältniszahl des Strontium-90 zum Kalzium im menschlichen Körper niedriger liegt als in den obersten Erdbodenschichten.

10.18 Verschiedene Faktoren erschweren es, ein allgemeingültiges Verhältnis des Strontiums-90 zum Kalzium in der Pflanze im Vergleich zum Erdboden, in dem sie wächst, festzulegen. Erstens wird den Pflanzen der größte Teil ihrer Mineralien durch ihre Wurzeln zugeführt, aber die Wurzelsysteme der Pflanzen sind verschieden; manche haben tiefreichende und andere weniger tiefreichende Wurzeln. Das meiste Strontium-90 findet man im Mutterboden dicht an der Oberfläche, so daß anzunehmen ist, daß die Aufnahme dieses Isotops je nach den Wachstumseigenarten der Pflanze verschieden ist. Zweitens: obwohl von Strontium und Kalzium auf Grund ihrer chemischen Gleichartigkeit angenommen werden kann, daß beide in das Wurzelsystem der Pflanzen eindringen können, wird nicht immer alles Kalzium vom Boden aufgenommen. Es gibt im Erdboden natürliche Kalziumverbindungen, die unlöslich sind und den Pflanzen erst dann als Nahrung dienen können, nachdem sie durch andere Stoffe, wie Humussäure, in neue Verbindungen umgewandelt wurden. Der größte Teil des im weltweiten radioaktiven Niederschlag vorhandenen Strontiums-90 kommt aber in wasserlöslicher Form vor. Drittens: obgleich Pflanzen in gewissem Umfange das Kalzium durch Strontium ersetzen können, ziehen sie offensichtlich das Kalzium vor. Viertens nehmen wachsende Pflanzen außer Strontium-90, das sie dem Erdboden entnehmen, auch eine gewisse Menge Strontium-90 aus dem radioaktiven Niederschlag auf, der sich unmittelbar auf der Oberfläche der Pflanzen abgelagert hat. Bisherige Versuchsergebnisse lassen aber darauf schließen, daß das Verhältnis des Strontiums-90 zum Kalzium in den Pflanzen allgemein etwas niedriger liegt als in dem Boden, auf dem die Pflanzen wachsen.

10.19 Als nächstes Glied in der Kette der Vorgänge werden die Pflanzen von den Tieren als Nahrung verbraucht, wobei Strontium-90 in ihren Körper gelangt. Auch

hier deuten Anzeichen darauf hin, daß durch natürliche Absonderungsfaktoren in eßbaren tierischen Produkten ein Verhältnis des Strontiums-90 zum Kalzium geschaffen wird, das niedriger liegt als im Viehfutter. Weiche Gewebe behalten sehr wenig Strontium zurück, so daß die in den eßbaren Teilen von Tieren vorhandenen Mengen von Strontium-90 unbedeutend sind. Es ist außerdem besonders interessant, daß das Verhältnis des Strontiums-90 zum Kalzium auch in der Kuhmilch wesentlich niedriger liegt als im Kuhfutter; dadurch gelangt bedeutend weniger in den menschlichen Körper. Diese Reduzierung erfolgt natürlich nicht, wenn die pflanzliche Nahrung dem Menschen direkt zugeführt wird. Es werden aber wohl in der Durchschnittsernährung der Menschen in den Vereinigten Staaten etwa $^3/_4$ des Kalziums und damit ein großer Prozentsatz an Strontium-90 mit der Milch oder Milchproduktion aufgenommen. In Gegenden, in denen bei der Kost mehr oder weniger Wert auf die Milch und Milchprodukte gelegt wird, kann die Lage anders sein.

10.20 Nicht alles Strontium-90, das mit der Nahrung aufgenommen wird, lagert sich im Knochenbau des Menschen ab. Ein großer Teil des Strontiums-90 wird, ebenso wie der größte Teil des täglich aufgenommenen Kalziums, wieder ausgeschieden. Aber im Knochenbau eines gesunden Menschen findet immer in gewissem Umfang eine neue Kalziumablagerung statt, wobei gleichzeitig auch Strontium-90 in den Körper gelangt. Die Menge des sich ablagernden Kalziums und Strontiums-90 ist bei Kindern im Wachstumsalter natürlich größer als bei Erwachsenen.

10.21 Außer der Tatsache, daß sich der menschliche Stoffwechsel gegen Strontium entscheidet, wird man feststellen, daß bei jedem einzelnen Glied der Kette der biologischen Vorgänge die Menge des zurückbehaltenen Strontiums etwas geringer ist als bei dem vorhergehenden Vorgang. Auf diese Weise wird die Ablagerung von Strontium-90 im menschlichen Knochenbau mehrfach verringert. Ein im Jahre 1955 angestellter Vergleich zwischen dem Verhältnis des Strontiums-90 zum Kalzium in den Knochen von Kindern und im Erdboden ergab einen Schwächungsfaktor von ungefähr $^1/_{12}$, d. h., das Verhältnis des Strontiums-90 zum Kalzium in den Knochen von Kindern betrug $^1/_{12}$ des im Erdboden vorhandenen Verhältnisses. Spätere Messungen lassen darauf schließen, daß der Prozentsatz des in den Knochenbau gelangenden Strontiums-90 noch bedeutend geringer sein kann.

Die Aktivitätsgrade von Strontium-90

10.22 Da keine Erfahrungen mit größeren Mengen Strontium-90 im menschlichen Körper vorliegen, ist auch die Beziehung zwischen der Wahrscheinlichkeit ernsthafter biologischer Auswirkungen und der Körperbelastung dieses Isotops nicht mit Sicherheit bekannt, sondern muß indirekt geschätzt werden. Derartige Schätzungen sind auf einem Vergleich der Wirkungen von Strontium-90 und Radium bei Versuchstieren und den bekannten Wirkungen des Radiums bei Menschen aufgebaut worden. Auf Grund dieser Vergleiche wurde geschätzt, daß 10 Mikrocurie (ein Mikrocurie ist, wie in Abschn. 9.118 erläutert, der millionste Teil eines Curie) Strontium im

Körper bei einem großen Teil der Bevölkerung zu einer beträchtlichen Zunahme des Auftretens von Knochenkrebs führen würde. Das »National Committee on Radiation Protection« (Nationaler Ausschuß für Strahlenschutz) und die »International Commission on Radiological Protection« (Internationale Kommission für radiologischen Schutz) haben aus diesem Grunde vorgeschlagen, daß bei Menschen, die in ihrem Beruf Strontium-90 ausgesetzt sind, die höchstzulässige (oder ungefährliche) Menge Strontium-90 im Körper 1 Mikrocurie betragen solle. Da die durchschnittliche Kalziummenge im Knochenbau eines Erwachsenen ungefähr ein Kilogramm beträgt, entspricht das einer Ansammlung von 1 Mikrocurie Strontium-90 je Kilogramm Kalzium im Knochenbau, d. i. $^1/_{10}$ der Menge, von der anzunehmen ist, daß sie im allgemeinen eine über das Normale hinausgehende feststellbare Wirkung hat. Für die Bevölkerung als Ganzes wird im allgemeinen 0,1 Mikrocurie Strontium-90 je Kilogramm Kalzium als annehmbare Grenze angesehen. Diese Grenze stimmt mit den 1956 gemachten Vorschlägen der »U. S. National Academy of Sciences« (Nationale Akademie der Wissenschaften der Vereinigten Staaten) überein.

10.23 Durch die Kernexplosionsversuche, die im Laufe der letzten Jahre in verschiedenen Ländern stattgefunden haben, hat der Strontium-90-Gehalt des Bodens, der Pflanzen und der Tierknochen wenig aber stetig zugenommen. Diese Steigerung erstreckt sich auf die ganze Welt und nicht nur auf Gebiete in der Umgebung der Versuchsgelände, obwohl sie hier wegen des mehr örtlich begrenzten radioaktiven Niederschlags natürlich etwas stärker ist[1]). Da die feinen Teilchen im Verlauf von mehreren Jahren aus der Stratosphäre niedersinken, kann damit gerechnet werden, daß die allmähliche Zunahme des Strontium-90-Gehaltes noch eine Zeitlang anhalten wird, obwohl der natürliche Zerfall hier in gewissem Umfange einen Ausgleich schafft.

10.24 Die Mengen Strontium-90, die sich bis jetzt in den Menschen angesammelt haben, liegen weit unter der Grenze, die für die gesamte Bevölkerung als zulässig angesehen wird, und sie sind viel geringer als die Mengen, bei denen mit einer merklichen Zunahme der Häufigkeit von Knochentumoren gerechnet werden könnte. Da sich der Knochenbau sehr kleiner Kinder unter den gegenwärtigen Bedingungen radioaktiven Niederschlags entwickelt hat, liefert hier der Gehalt an Strontium-90 den besten Hinweis auf den maximalen Spiegel, mit dessen Vorhandensein man vielleicht rechnen muß. Bis zum Januar 1950 lag dieser Spiegel etwas unter $^1/_{1000}$ (0,001) Mikrocurie Strontium-90 je Kilogramm Kalzium. Obgleich er sich noch etwas erhöhen dürfte, ist es ziemlich sicher, daß – wenn künftige Kernversuche in ungefähr gleichem Umfange wie bisher durchgeführt werden – keine langfristigen biologischen

---

[1]) Wie in Abschn. 10.10 ausgeführt, wird bei einer Explosion an oder nahe der Erdoberfläche ein beträchtlicher Teil des sich dabei bildenden Strontiums-90 im örtlichen radioaktiven Niederschlag gefunden. Man kann damit rechnen, daß Gebiete in der Nähe der Explosion durch dieses Isotop stärker verstrahlt werden als entlegenere Gebiete; das Ausmaß der Verstrahlung hängt von Faktoren wie der Explosionshöhe (oder -tiefe), dem gesamten Explosionswert sowie den meteorologischen Bedingungen ab. Es hat sich gezeigt, daß bei dem örtlich auftretenden Niederschlag das Strontium-90 einen kleineren Prozentsatz der gesamten Spaltungsprodukte ausmacht als bei dem weiter entfernt auftretenden Niederschlag. Das kann durch die Tatsache erklärt werden, daß Strontium-90 kein direktes Spaltungsprodukt ist und deshalb nicht im Augenblick der Explosion entsteht. Vielmehr bildet es sich allmählich im Verlauf einiger Minuten, da der radioaktive Zerfall in zwei Stadien, beginnend mit dem beim Spaltungsprozeß auftretenden Gas Krypton-90, vor sich geht (s. Abschn. 11.121).

Auswirkungen von Strontium-90 feststellbar sein werden. Falls bei einem Kriege Kernwaffen mit hohem Explosionswert in großem Umfang eingesetzt werden, würden Berechnungen, die sich auf etwas ungenauen Voraussetzungen aufbauen, darauf schließen lassen, daß der Sprengkörperstaub aus vielen tausend Megatonnen Spaltungsprodukten in die Stratosphäre gelangen müßte, bevor der weltweite Niederschlag aus diesen Kernwaffen zur Ansammlung von 1 Mikrocurie Strontium-90 je Kilogramm Kalzium im menschlichen Körper führen würde[1]).

[1]) Sehr gründliche und umfassende Untersuchungen der Gefahr des Strontium-90 und ihrer Bekämpfungsmethoden werden im Auftrage der Atomenergiekommission der Vereinigten Staaten durchgeführt (Projekt Sunshine). Zusammenfassende Berichte und Literaturhinweise siehe W. F. Libby, Science, *123*, 657 (1956); Proceedings of the National Academy of Sciences, *42*, 365, 945 (1956); J. L. Kulp, W. R. Eckelmann und A. R. Schulert, Science, *125*, 129 (1957).

KAPITEL XI

Die Wirkungen auf den Menschen

Einleitung

Die Verluste bei Kernwaffenexplosionen

11.1 Bei Kernwaffenexplosionen kommt es in einem größeren Gebiet durch Luftdruck und Brände zu Beschädigungen und Zerstörungen von Gebäuden. Dabei ist auch mit einer entsprechend großen Zahl von Verlusten zu rechnen. Die in Tabelle 11.1 aufgeführten Zahlenangaben stellen die besten zur Zeit verfügbaren Schätzungen der Verluste unter der Zivilbevölkerung dar, die in Hiroshima und Nagasaki bei der Luftexplosion von Atomsprengkörpern mit ungefähr 20-kt-Explosionswert entstanden sind. Die durchschnittlichen Verlustziffern sind unter Zugrundelegung einer Bevölkerungsdichte von einem Einwohner je 100 Quadratmeter berechnet worden. Die zu Vergleichszwecken hier gegebene durchschnittliche Verlustziffer in einer Stadt beträgt bei einem Sprengkörper mit einem Explosionswert von einer Tonne TNT ungefähr 40.

Tabelle 11.1 Die geschätzten Verluste in Hiroshima und Nagasaki bei Kernexplosion von 20 kt

	Hiroshima	Nagasaki
Gesamtbevölkerung	255000	195000
zerstörtes Gebiet km^2	12,2	4,7
Tote und Vermißte	70000	36000
Verletzte	70000	40000
durchschnittliche Verlustziffern	260000	130000

11.2 Die bei einer Kernexplosion auftretenden Verletzungen von Personen gliedern sich in drei Hauptkategorien: Luftdruck-, Wärme- und Strahlungsschäden. Die Wirkungen des Luftdruckes aus einem Atomsprengkörper sind, im ganzen gesehen, denen der herkömmlichen Waffen ähnlich. Ein bedeutender Unterschied liegt aber darin, daß bei einer Kernexplosion die Zahl und die Verschiedenartigkeit der in einem kurzen Zeitraum erlittenen Verletzungen sehr viel größer sind. Die meisten der nach einer Luftexplosion auftretenden Verbrennungen sind Blitzverbrennungen, obgleich Menschen, die von um sich greifenden Bränden eingeschlossen werden, auch Brandwunden durch Flammen davontragen können. Im letzteren Fall sind die Begleitumstände ähnlich wie bei einem ausgedehnten Angriff mit Brandbomben. Jedoch stellen die Verletzungen durch Kernstrahlungen in der Kriegführung eine völlig neue Ursache für Verluste dar.

11.3 Über die durch Anwendung von Kernwaffen zu erwartenden Verluste liegen Erfahrungen nur aus den Luftexplosionen über Japan vor; deshalb sind diese weitgehend als Grundlage für die nachfolgende Abhandlung herangezogen worden. Wahrscheinlich werden aber selbst bei Explosionen gleichen Explosionswertes die Gesamtzahl der Verluste sowie die Verteilung der verschiedenen Arten von Verletzungen in hohem Grade durch die Umstände beeinflußt. Einige der zu erwähnenden Faktoren sind – abgesehen vom Explosionswert – die Höhe und Art der Explosion, die Geländeform, die baulichen Merkmale der Gebäude in der Stadt, die Verteilung der Bevölkerung (d. h. Verwendung von Schutzbauten, Evakuierung usw.) und die Wetterbedingungen.

11.4 Wie in Abschn. 7.69 ausgeführt, war das häufige Vorkommen von Blitzverbrennungen in Japan zweifellos durch das zur Zeit der Angriffe herrschende warme und klare Sommerwetter bedingt. Hätte über den Städten eine niedrigere Wolkendecke gehangen, oder wäre es sehr dunstig oder klar gewesen, so daß sich weniger Menschen im Freien aufhielten, die zudem mehrere Kleidungsstücke übereinander getragen hätten, dann wäre die Zahl der Blitzverbrennungen viel geringer gewesen. Ferner entstanden bei der ziemlich hohen Luftexplosion keine Verluste durch Rückstandsstrahlung, viele dagegen durch Anfangsstrahlung. Die nachstehenden Angaben beziehen sich daher nur auf die in Japan gegebenen besonderen Umstände und sind nicht unbedingt typisch. Auch trugen in Japan die mangelnden Möglichkeiten, eine Katastrophe solchen Ausmaßes zu bewältigen, zur Zahl der Todesfälle bei.

Die Ursache der Todesfälle

11.5 Genaue Angaben über die relative Bedeutung der Verletzungen durch Druckwelle, Verbrennungen und Kernstrahlungen als Ursache der Todesfälle bei den Atomangriffen auf Japan liegen nicht vor. Es wurde festgestellt, daß über 50% der Todesfälle durch Verbrennungen der einen oder anderen Art verursacht wurden, obgleich diese Zahl nur eine grobe Schätzung darstellt. Auch wurde berichtet, daß nahezu $^2/_3$ derjenigen, die in Hiroshima am ersten Tag nach der Explosion starben, schwere Verbrennungen erlitten hatten. Überdies starben im Verlauf der ersten Woche mehr Menschen durch die Blitzverbrennungen als durch andere Verletzungen.

11.6 Eine der Schwierigkeiten, die Bedeutung der verschiedenen Verletzungen zu beurteilen, liegt in der Tatsache, daß viele der durch den Luftdruck Verletzten auch Verbrennungen erlitten hatten. Zweifellos war das auch das Schicksal anderer, die schließlich den Wirkungen der Kernstrahlung erlegen wären. Etwa innerhalb von 0,8 km vom Nullpunkt hätten wahrscheinlich in zahlreichen Fällen sowohl der Luftdruck als auch die Verbrennungen und die Strahlung unabhängig voneinander tödlich gewirkt.

11.7 Es muß jedoch hervorgehoben werden, daß auf Grund verschiedener Umstände nicht alle Menschen im Umkreis von 800 m getötet wurden. Von denen, die die unmittelbaren Folgen der Explosion in Hiroshima und Nagasaki überstanden, starben

einige zwei oder mehr Wochen später an Symptomen, die der Verletzung durch Kernstrahlung zugeschrieben wurden (s. Abschn. 11.43ff.). Diese werden mit 5–15% der gesamten Verluste angenommen. Nach grober Schätzung hatten ungefähr 30% derjenigen, die in Hiroshima starben, eine tödliche Dosis Kernstrahlen empfangen, obwohl dies nicht in allen Fällen die unmittelbare Todesursache war.

Die Ursache der Verletzungen

11.8 Aus Untersuchungen an einer großen Anzahl von Japanern hat man ein ziemlich gutes Bild darüber gewonnen, wie sich die drei Verletzungsarten auf diejenigen verteilten, die zwar verwundet wurden, aber die Kernwaffenangriffe dennoch überlebten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 11.8 wiedergegeben. Es ist festzustellen, daß sich die Gesamtsummen auf mehr als 100% belaufen, so daß viele Menschen mehrfache Verletzungen erlitten hatten.

Tabelle 11.8 Art der Verletzungen der überlebenden Personen

Verletzung	Überlebende in %
Druckschäden	70
Verbrennungen	65–85
Kernstrahlung	30

11.9 Die Zahl der Gesamtverluste war in Japan bei denen am höchsten, die sich zur Zeit der Explosion im Freien aufhielten. Bei den Personen, die sich in Wohnbauten (Lehm- oder hölzernen Fachwerkbauten) befanden, lag diese Zahl niedriger; am geringsten war sie bei denjenigen, die sich in Betonbauten aufhielten. Aber der Prozentsatz der Verletzungen durch mechanische Wirkungen, z. B. durch umherfliegende Trümmer oder Splitter, war bei den Überlebenden im Freien am niedrigsten und in Betonbauten am höchsten. Umgekehrt war es, wie zu erwarten, in bezug auf die Wirkungen der thermischen und der Kernstrahlung, da die Gebäude, insbesondere solche massiver Bauart, einigen Schutz boten.

Die Art der Explosion

11.10 Wenn auch die Luftexplosion die einzige Kernexplosionsart ist, über die Informationen bezüglich der Verluste vorliegen, können doch hinsichtlich anderer Explosionsarten gewisse Rückschlüsse hieraus gezogen werden. Bei einer Untererdexplosion ist die Zahl der durch thermische Strahlung (Blitzverbrennungen) und durch Anfangsstrahlung verursachten Verluste viel geringer, weil nur ein kleiner Bruchteil dieser Strahlung in die Luft entweicht. Die Verletzungen durch den Luft-

druck sind hierbei wahrscheinlich geringer als bei einer Luftexplosion gleichen Explosionswertes, da der Luftdruck nicht so stark ist. Jedoch wird es bei einer Untererdexplosion in geringer Tiefe im Bereich des hierbei entstehenden Kraters infolge der mechanischen Wirkungen nur wenig Überlebende geben. Bei Boden- oder Untererdexplosionen treten Verletzungen anderer Art auf, z. B. durch die Rückstandsstrahlung aus dem radioaktiven Niederschlag. Todesfälle werden aber hierdurch in den ersten Tagen oder Wochen nach der Explosion nicht verursacht.

11.11 Die Verluste bei Bodenexplosion eines Atomsprengkörpers entstehen durch die mechanischen Wirkungen des Luftdrucks und der Kraterbildung im Erdreich, durch Blitzverbrennungen, durch Anfangsstrahlung und auch durch Rückstandsstrahlung. Die Blitzverbrennungen und die Verletzungen durch Anfangsstrahlung sind wohl etwas geringer als bei einer Luftexplosion gleichen Explosionswertes, jedoch können die Wirkungen der Rückstandsstrahlung wegen des ausgedehnten radioaktiven Niederschlags sehr gefährlich sein.

Art der Verletzungen

Direkte Verletzungen durch die Luftdruckwelle

11.12 Es sind zwei Arten von Verletzungen durch die Luftdruckwelle in Betracht zu ziehen, nämlich die direkte und die indirekte. Direkte Luftdruckschäden entstehen in der positiven Phase der Luftdruckwelle (s. Abschn. 3.5), die so auf den Körper einwirkt, daß sie zu Verletzungen der Lunge, des Magens, des Darmes und des Trommelfells und außerdem zu inneren Blutungen führt. Derartige Verletzungen sind auch nach Großangriffen mit herkömmlichen Sprengkörpern beobachtet worden. Aber in Japan lag die Hauptursache der Verluste nicht in den direkten Druckwirkungen, da diejenigen, die sich nahe genug aufhielten, um hierdurch schwere Verletzungen davonzutragen, tödliche Verbrennungen oder Quetschungen erlitten. Unter den Überlebenden trat kein einziger Fall direkter Schäden an inneren Organen durch den Luftdruck auf, nur in einigen Fällen ein Platzen des Trommelfells. Die Zahl dieser Fälle war nicht groß und fast ausschließlich auf Personen beschränkt, die sich im Umkreis von etwa 1 km vom Nullpunkt aufhielten[1]).

11.13 Viele Menschen, die keine schweren Verletzungen davontrugen, berichteten, daß sie vorübergehend bewußtlos waren. Man nimmt an, daß dies auf der direkten Wirkung des Luftdrucks beruhte, aber es ist auch möglich, daß die Menschen durch die Luftdruckwelle heftig weggeschleudert und dadurch bewußtlos wurden.

[1]) Der Luftstoß-Überdruck, der nötig ist, um das Trommelfell zum Platzen zu bringen, scheint in hohem Grade von den näheren Umständen abhängig zu sein. Verschiedene Beobachtungen deuten darauf hin, daß der Mindestüberdruck zwischen 0,7 und 1,0 kg/cm² liegt, aber es sind auch niedrigere und höhere Werte angegeben worden.

11.14 Aus Beobachtungen an herkömmlichen Sprengkörpern geht hervor, daß eine Überdruckspitze von 14–21 kg/cm² nötig sein würde, um Menschen durch die direkte Wirkung des Luftdruckes zu töten, und daß vielleicht 5,6 kg/cm² zu Verletzungen führen würden. Aber diese Schlußfolgerungen gelten nicht unbedingt auch für eine Kernexplosion. Außer der Überdruckspitze des Luftstoßes haben die Geschwindigkeit des Druckanstiegs und die Dauer der positiven Phase einen bedeutsamen Einfluß.

11.15 Wenn der Druck an der Stoßfront rasch ansteigt oder die positive Phase längere Zeit anhält (oder wenn beides zugleich der Fall ist), dann können schwere Verletzungen (oder der Tod) durch den Luftdruck schon bei viel geringerer Überdruckspitze vorkommen als bei langsamem Anstieg oder kürzerer Dauer des Überdrucks.

Versuche weisen z. B. darauf hin, daß eine 7fache Zunahme der Dauer der Luftdruckwelle ein dreifaches Absinken des Überdrucks zur Folge hat; bei Hunden tritt hierdurch der Tod ein. Da die Dauer der positiven Phase einer Luftdruckwelle bei einem Atomsprengkörper wesentlich länger ist als bei Detonation eines herkömmlichen Sprengkörpers, ist damit zu rechnen, daß eine Überdruckspitze, die weit unter 14 oder 5,6 kg/cm² liegt, zum Tode bzw. zu Verletzungen führt.

11.16 Die Gesamtwirkung einer Luftdruckwelle auf den menschlichen Körper ist ähnlich wie bei einem Bauwerk (s. Kap. III). Wegen der geringen Größe des Körpers ist der Umströmungsprozeß schnell vorüber; der Körper wird rasch von der Druckwelle umschlossen und dabei stark zusammengedrückt. Dieser Vorgang setzt sich mit nachlassender Intensität die ganze positive Phase hindurch fort. Gleichzeitig übt der Winddruck einen starken Strömungswiderstand aus.

11.17 Durch den Druck und das darauffolgende Nachlassen des Druckes kommt es zu körperlichen Schädigungen hauptsächlich an den Stellen zwischen den Geweben und den lufthaltigen Organen und dort, wo die Knochen und Knorpelgewebe an weiche Gewebe grenzen. Die Folgeerscheinungen sind hauptsächlich Schäden am Zentral-Nerven-System, Herzschlag auf Grund direkter Störung der Herzfunktion sowie Ersticken durch Lungenbluten oder Eindringen von Flüssigkeit in die Lungen. Auch können innere Blutungen des Magendarmkanals eintreten.

11.18 Der Druck des Strömungswiderstands (oder Windes) kann zu einem Wegschleudern des Körpers als ganzem führen. Die sich daraus ergebenden Verletzungen (sofern es zu solchen kommt) hängen von vielen Umständen ab, vor allem von der Geschwindigkeit, mit welcher der Körper sich bewegt, von der Beschleunigung und Verlangsamung, von dem Gegenstand, auf den der Körper auftrifft, und von dem Körperteil, der den Schlag aufnimmt. Die Kraft, welche die Geschwindigkeit der Bewegung bestimmt, wird weitgehend durch die Größe der Auftrefffläche des dem Winddruck ausgesetzten Körpers beeinflußt. Jemand, der lang hingestreckt liegt, wird z. B. viel weniger verletzt als jemand, der aufrecht steht.

Indirekte Verletzungen durch die Druckwelle

11.19 Von größerer Bedeutung als die primären Verletzungen durch die Druckwelle waren bei den Atomangriffen auf Japan die indirekten oder sekundären Wirkungen auf Grund einstürzender Gebäude und der großen Menge und Vielfalt der durch den Luftdruck umhergeschleuderten Trümmer. Während nur wenige Personen dadurch Verletzungen davontrugen, daß sie heftig gegen feststehende Objekte geschleudert wurden, erlitten doch sehr viel mehr Menschen Verletzungen durch umherfliegende Trümmer, oder sie wurden unter Gebäuden zerschmettert und verschüttet. Insbesondere drangen Glassplitter und in geringem Umfang auch Holzsplitter und Metallstücke bis 2,5 cm tief in den Körper ein, manchmal sogar durch mehrere Kleidungsstücke hindurch. Die Kleidung bot nur einen gewissen Schutz, wenn es sich um kleinere Splitter handelte.

11.20 Im Verlauf der 1955 in Nevada durchgeführten Versuche wurden auch Untersuchungen über die umherfliegenden Gegenstände innerhalb von Häusern und im Freien hinter den Häusern durchgeführt. Diese Versuche sind in Kap. IV beschrieben. In Tabelle 11.20 sind einige der erzielten Ergebnisse aufgeführt, insbesondere über die maximale Falldichte und Geschwindigkeit dieser Gegenstände. Ein ziemlich scharfer Gegenstand, z. B. Glas, kann bei den in der Tabelle aufgeführten Geschwindigkeiten die Bauchdecke von Versuchstieren durchdringen. Bei den meisten der innerhalb der Häuser aufgesammelten Gegenstände handelte es sich um Glasstücke, während draußen Glas- und Mauerwerksstücke, Steinbrocken und Holzteile herumlagen. An Stellen, die durch Häuser und große Maschinenteile abgeschirmt waren, verringerte sich die Zahl der vom Luftdruck weggeschleuderten Gegenstände wesentlich.

Tabelle 11.20 Falldichte und Geschwindigkeit der umhergeschleuderten Gegenstände

Überdruckspitze kg/cm^2	Maximale Falldichte (Stück pro m^2)	Geschwindigkeit der Gegenstände m/sec
0,350	710–2230 Stück/m^2	18–104
0,266	183– 710 Stück/m^2	18– 85
0,133	1– 43 Stück/m^2	15– 50

11.21 Die Art der indirekten Luftdruck- (oder mechanischen) Verletzungen reichte bei den Japanern vom völligen Zerschmettertwerden, schweren Brüchen und tiefen Fleischwunden mit Blutungen bis zu geringfügigen Kratzern, Prellungen und Quetschungen. In Hiroshima wurden bis zu einer Entfernung von etwa 3 km vom Nullpunkt Patienten wegen ihrer Fleischwunden behandelt; in Nagasaki kamen solche Verwundungen noch 3,5 km vom Nullpunkt vor. Es sind dies Entfernungen, bei denen schwere Schäden an Fensterscheiben eintreten.

11.22 Interessant war die in Japan unter den Überlebenden gemachte Beobachtung, daß schwere Verletzungen durch mechanische Wirkungen verhältnismäßig

selten vorkamen. So befanden sich z. B. unter 675 Patienten keine Fälle mit Schädel- oder Rückgratbrüchen und nur ein einziger gebrochener Oberschenkel, obwohl es zweifellos zu vielen derartigen Verwundungen gekommen sein mußte. Dieser Umstand wird damit erklärt, daß sowohl Personen, die schwere Prellungen oder Brüche erlitten hatten oder die durch Beinverletzungen hilflos geworden waren, als auch diejenigen, die unter den Trümmern verschüttet lagen, von Flammen eingeschlossen wurden. Die auf diese Weise Verletzten bleiben natürlich nicht am Leben.

11.23 Es wurde festgestellt, daß die Art und der Grad der Verletzungen durch mechanische Wirkungen weitgehend davon abhingen, ob sich die Menschen zur Zeit der Explosion im Freien oder in einem Gebäude aufgehalten hatten. Im allgemeinen waren bei den Überlebenden die Verletzungen durch mechanische Wirkungen im Freien weniger schwer und weniger häufig; hier starben, wie oben schon gesagt wurde, viele Menschen durch andere Ursachen. Die Verletzungen durch mechanische Wirkungen waren in Gebäuden schwerer; ihr Ausmaß hing von der Konstruktion des Gebäudes, insbesondere von der vorhandenen Glasmenge ab.

11.24 Die Untersuchung einer Anzahl Überlebender in einem Militärlazarett in Hiroshima ergab einige zuverlässige Informationen über verschiedene Arten der Verletzung durch mechanische Wirkungen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 11.24 zusammengefaßt. Bei diesen wie bei anderen Fällen kamen selten Brüche vor; insgesamt machten sie bei den Überlebenden nur etwa 5% der indirekten Verletzungen durch Luftdruck aus.

Tabelle 11.24 Verletzungen durch mechanische Wirkungen in Hiroshima

Verletzungen	Prozentsatz
Brüche	11
Fleischwunden	35
Quetschungen	54

11.25 Die Wunden heilten oft nur langsam, und es traten dabei Infektionen auf. Dafür gab es verschiedene Erklärungen. Einmal waren außer den Verletzungen durch mechanische Wirkungen auch Strahlungsschäden aufgetreten, wodurch sich die Infektionsempfindlichkeit des Körpers erhöhte (s. Abschn. 11.67). Zum andern fehlten geeignete Behandlungsmöglichkeiten, da nach den Kernexplosionen die Zahl der Opfer groß war und ein allgemeines Durcheinander herrschte.

Verbrennungen durch Feuer und Hitzeblitz

11.26 Wie in Kap. VII ausgeführt, kamen in Hiroshima und Nagasaki zwei Arten von Verbrennungen vor: 1. durch Feuer oder Flammen, 2. durch Hitzeblitz auf Grund der thermischen Strahlung. Diese beiden Arten von Verbrennungen unterscheiden sich dadurch, daß bei Blitzverbrennungen auf Grund teilweiser Abdeckung,

z. B. durch Kleidung (s. Abschn. 7.71) die Verbrennungen »profilartig«, d. h. fest umrissen waren. Verbrennungen durch Flammen dagegen erstreckten sich auf große Teile des Körpers, da die Kleidung meist schnell Feuer fing. Dort, wo große Teile des Körpers der thermischen Strahlung ausgesetzt waren, dehnten sich auch die Blitzverbrennungen über große Flächen aus.

11.27 Bei den Überlebenden waren die Verbrennungen durch Flammen sehr selten. Sie machten vermutlich nicht mehr als 5% der gesamten Brandverletzungen aus. Das kam daher, daß die meisten derjenigen, die Verbrennungen durch Flammen erlitten hatten, nicht am Leben blieben, weil sie in brennenden Häusern eingeschlossen waren und sich nicht retten konnten. Die Merkmale derVerbrennungen durch Flammen nach den Atomangriffen auf Japan waren ähnlicher Art wie bei sonstigen Großbränden; deshalb braucht hier nicht näher darauf eingegangen zu werden.

11.28 Verbrennungen durch Hitzeblitz kamen – wie bereits ausgeführt – sowohl in Hiroshima als auch in Nagasaki sehr häufig vor. Aus Hiroshima wurden z. B. über 40000 ziemlich schwere Fälle von Verbrennungen gemeldet. Abgesehen von den anderen Verletzungen wären die Blitzverbrennungen bei nahezu allen Personen, die sich ohne sonderlichen Schutz im Freien aufgehalten hatten, bis zu einer Entfernung von 1,8 km vom Nullpunkt und darüber hinaus tödlich verlaufen. Selbst in 3,5–4 km Entfernung gab es noch Verbrennungen durch thermische Strahlung, die so schwer waren, daß sie behandelt werden mußten.

11.29 Am häufigsten waren die Blitzverbrennungen natürlich bei den Personen, die sich im Freien aufhielten. Trotzdem war die Zahl derartiger Verbrennungen auch bei denen überraschend hoch, die sich in den Häusern aufgehalten hatten. Dies war weitgehend darauf zurückzuführen, daß an vielen Fenstern, besonders in Geschäftshäusern, keine Vorhänge vorhanden waren oder die Fenster des sommerlichen Wetters wegen weit offen standen. Deshalb waren viele Personen in den Gebäuden der thermischen Strahlung unmittelbar ausgesetzt. Außer der Abschirmung, die die Kleidung bot, besonders wenn diese von heller Farbe war (s. Kap. VII, Abbildung 7.72 und 7.78), bewirkten hervorstehende Teile des Körpers, z. B. die Nase, die Erhöhungen über den Augenhöhlen und das Kinn einen gewissen Schutz.

11.30 Obgleich in Japan nach den Atomangriffen Tausende von Blitzverbrennungen festgestellt wurden, ist nur über ihre allgemeinen Merkmale berichtet worden. Aber diese Angaben sind inzwischen durch Beobachtungen ergänzt worden, die man besonders an betäubten Schweinen sowohl im Labor als auch bei Kernexplosionsversuchen gemacht hat. Es wurde festgestellt, daß die Haut weißer Schweine auf die thermische Strahlung in einer Weise reagiert, die in vielerlei Hinsicht der Reaktion der menschlichen Haut ähnlich ist.

11.31 Die Blitzverbrennungen sind nicht nur auf die ungeschützten Teile des Körpers begrenzt, sondern dringen in den meisten Fällen viel weniger tief in die Haut ein als Verbrennungen durch Flammen. Damit ist zu rechnen, wenn die zu Verbrennungen führende thermische Strahlung nur sehr kurze Zeit ausgesandt wird.

Bei den 20-kt-Explosionen über Japan z. B. dauerte diese Zeit ungefähr 1 Sekunde. Dabei wird dicht an der Haut in einem sehr kurzen Zeitraum eine sehr hohe Tempera-

tur erzeugt. Aus diesem Grunde unterscheiden sich einige der Merkmale der Blitzverbrennungen außer ihrer geringeren Tiefenwirkung von den Merkmalen anderer, häufiger vorkommender Verbrennungen. Diese Unterschiede sind weniger augenscheinlich, wenn die thermische Strahlung über einen längeren Zeitraum einwirkt, z. B. bei Explosion einer Kernwaffe mit hohem Explosionswert.

11.32 Die Schwere der Blitzverbrennungen reichte in Japan von leichter Rötung bis zur Verkohlung der äußersten Hautschichten. Im Gegensatz zu Kontaktverbrennungen bei niedriger Temperatur traten keine Ödeme (Flüssigkeitsansammlungen) in den unteren Gewebeschichten auf. Bei den Personen, die sich im Umkreis von 1,8 km vom Nullpunkt befunden hatten, bestanden die Brandverletzungen aus farblosen Fleischwunden, aber in größeren Entfernungen von etwa 2–3,5 km entwickelte sich nach der ersten Hautrötung eine wallnußähnliche Hautverfärbung, die manchmal »die Maske von Hiroshima« genannt wird.

11.33 Mittlere Verbrennungen zweiten und schwächeren Grades heilten meist innerhalb von vier Wochen, aber bei schwereren Verbrennungen trat oft eine Infektion ein, so daß sich der Heilungsprozeß sehr viel mehr in die Länge zog. Selbst unter den günstigsten Bedingungen ist es schwierig, bei Brandwunden Infektionen zu verhüten, und nach den Atomangriffen auf Japan war die Lage durch unzulängliche Pflege, mangelhafte sanitäre Einrichtungen und das Fehlen geeigneter Anlagen allgemein noch erschwert. Die Verletzungen durch Kernstrahlung stellten wegen des Nachlassens der körperlichen Widerstandskraft gegen Infektionen in manchen Fällen einen erschwerenden Faktor dar.

11.34 Zu Versuchszwecken sind sowohl im Labor als auch bei Kernversuchen Blitzverbrennungen verursacht worden, die denen von Hiroshima und Nagasaki offenbar ganz ähnlich waren. In schwereren Fällen ergab sich eine verkohlte Fläche mit weißer Umrandung, umgeben von stark geröteten Hautflächen. Es wurde in bezug auf Umfang und Tiefe der Brandwunden eine deutliche Abgrenzung festgestellt; dadurch unterschieden sich diese Verletzungen von Kontaktverbrennungen, deren Tiefenwirkung im allgemeinen schwankt. Die Oberfläche der Blitzverbrennungen trocknete, ohne stark zu nässen oder Gewebeflüssigkeit abzusondern.

11.35 Eine andere Erscheinung nach dem Abheilen einiger schwerer Brandwunden war in Japan die Bildung von Keloiden, d. s. dicke Wucherungen des Narbengewebes. Es wurde vermutet, daß dies eine Folge der Kernstrahlung sein könnte, aber diese Ansicht ist nicht mehr allein gültig. Der Grad der Keloidbildung wurde zweifellos durch Infektionen, die das Abheilen der Brandwunden erschwerten, und durch schlechte Ernährung beeinflußt. Ein weiterer Faktor ist die Tatsache, daß die Japaner leichter zur Keloidbildung neigen; das ist bei ihnen ein Rassemerkmal. Nach dem Abheilen der durch die Brandbombenangriffe auf Tokio verursachten Brandwunden bildeten sich z. B. viele augenfällige Keloide. Interessant ist die Feststellung, daß bei den Keloiden die Tendenz beobachtet wurde, im Laufe der Zeit allmählich wieder zu verschwinden.

Die Wirkungen der thermischen Strahlung auf die Augen

11.36 Die Wirkungen der thermischen Strahlung auf die Augen sind zweifacher Art: 1. Netzhautverbrennungen, 2. durch Hitzeblitz verursachtes Erblinden. Netzhautverbrennungen können entstehen, wenn sich genügend direkte Wärmeenergie auf der Netzhaut des Auges konzentriert. Durch die Linsenkonzentration kann so viel Energie angesammelt werden, daß auf der Netzhaut eine Verbrennung noch in einer Entfernung von der Explosion eintreten kann, in der die Intensität der thermischen Strahlung zu gering ist, um Hautverbrennungen zu verursachen. Durch unzureichenden Schutz bei Versuchen mit einer Kernwaffe von etwa 20 kt Explosionswert entstanden bei einigen Personen in 16 km Entfernung Netzhautverbrennungen. Es wird angenommen, daß derartige Verbrennungen bei entsprechenden Bedingungen sogar in größeren Entfernungen vorkommen können.

11.37 Ein großer Teil der thermischen Strahlung, auf die die Blitzverbrennungen zurückzuführen sind, setzt so schnell nach der Explosion ein, daß Reflexbewegungen, wie Blinzeln oder Pupillenverengung nur einen begrenzten Schutz bieten. Nachts, wenn sich das Auge der Dunkelheit angepaßt hat und die Pupille groß ist, könnten Netzhautverbrennungen in noch größeren Entfernungen von der Kernexplosion vorkommen als am Tage. In allen Fällen tritt zumindest ein vorübergehender Verlust der Sehschärfe ein; aber die endgültige Wirkung hängt davon ab, wie schwer die Verbrennung ist und an welcher Stelle sie erfolgt. Wenn die Verbrennung leicht ist oder an der Peripherie des Sehfeldes erfolgt, dann wird die Sehschärfe kaum beeinträchtigt, aber in schweren Fällen könnte es zu einem beträchtlichen Verlust an Sehkraft kommen.

11.38 Es ist möglich, daß kleine, dauernd blinde Stellen auf der Netzhaut hervorgerufen werden, wenn die Augen unmittelbar auf den Feuerball gerichtet waren, so daß im Bereich der zentralen Sehkraft das Abbild des Feuerballs entsteht. Aber die Wahrscheinlichkeit, daß jemand direkt in den Feuerball blickt, ist besonders bei Kernwaffen mit geringem Explosionswert, die nur für kurze Zeit eine intensive Wärme ausstrahlen, gering. Viel wahrscheinlicher dagegen ist eine vorübergehende »Hitzeblitzerblindung« oder ein »Geblendetwerden«, wenn das Auge von dem blendenden Licht überflutet wird, das vom Himmel, von der Erde oder der sonstigen Umgebung gestreut wird. Aber hierbei handelt es sich nur um eine vorübergehende Störung; gewöhnlich gewinnt man die Sehkraft nach kurzer Zeit zurück.

11.39 Interessant ist die Tatsache, daß unter den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki die Augenverletzungen, die unmittelbar auf die thermische Strahlung zurückzuführen waren, anscheinend relativ unbedeutend waren. Eine vorübergehende Blendung trat jedoch in vielen Fällen ein. Sie dauerte gelegentlich bis zu zwei oder drei Stunden; aber schwere Augenverletzungen kamen nur selten vor.

11.40 In einigen Fällen traten Augenverletzungen in Erscheinung, die als Keratitis (Hornhautentzündung) bekannt sind. Ihre Symptome, darunter Schmerzen bei Lichteinwirkung, das Gefühl, einen Fremdkörper im Auge zu haben, Tränenabsonderung und Rötung, dauern einige Stunden bis zu mehreren Tagen an. Unter 1000

beliebig ausgesuchten Fällen, in denen sich die Menschen zur Zeit der Explosion in einer Entfernung von etwa 1,8 km vom Nullpunkt im Freien befanden, wurde nur von 42 Keratitisfällen berichtet, die schon am ersten Tag in Erscheinung getreten waren. 14 weitere Fälle traten später noch auf, bei denen sich die Symptome zu unterschiedlichen Zeiten, einen oder mehrere Monate nach der Explosion, zeigten. Es ist möglich, daß bei diesen Patienten die Schäden durch Kernstrahlung, deren Symptome ebenfalls erst später auftreten, wie wir weiter unten sehen werden, eine Rolle gespielt haben.

11.41 Nachforschungen haben ergeben, daß bei den 1000 untersuchten Personen offenbar in keinem einzigen Falle die Wirkung der thermischen Strahlung auf die Augen so stark war, daß sie eine dauernde Trübung der Hornhaut verursacht haben könnte. Diese Feststellung ist angesichts der schweren Gesichtsverbrennungen bei vielen Patienten überraschend. Bei ungefähr einem Viertel aller untersuchten Fälle waren die Gesichtshaut und oft auch die Augenbrauen und Wimpern verbrannt. Dennoch war nach ungefähr drei Jahren die Hornhaut dieser Patienten wieder normal. Bei keinem aus der untersuchten Gruppe entwickelten sich zentral gelegene Scotomata (blinde Flecke), obgleich mehrere aussagten, daß sie zur Zeit der Explosion in Richtung des Atomsprengkörpers geblickt hätten.

11.42 Es wurden verschiedene Gründe dafür vorgebracht, warum es in Japan so selten zu schweren Augenverletzungen kam. Wahrscheinlich war z. B. der Blinzelreflex doch schnell genug, um einen guten Schutz zu bieten. Eine andere denkbare Erklärung ist, daß die etwas vertiefte Lage der Augen und insbesondere das überhängende Oberlid dazu beitrugen, die unmittelbare Wärmebestrahlung zu verringern. Aller Wahrscheinlichkeit nach war nur ein kleiner Teil der Personen tatsächlich der Explosion zugekehrt, und die Pupillen waren wegen des hellen Sonnenlichts so verengt, daß die der Strahlung ausgesetzte Fläche verringert wurde.

Verletzungen durch Kernstrahlung

11.43 Die schädlichen Wirkungen der Kernstrahlung aus einem Atomsprengkörper sind Erscheinungen, die bei herkömmlichen Detonationen überhaupt nicht auftauchen. Deshalb soll das Thema der Strahlenschäden (oder -erkrankungen) hier mit einer gewissen Ausführlichkeit erörtert werden. Das soll natürlich nicht bedeuten, daß die Kernstrahlung die Hauptursache der Verluste bei einer Kernexplosion ist. Wie bereits ausgeführt, war dies jedenfalls in Japan, wo die Sprengkörper ungefähr 565 m über dem Erdboden explodierten, bestimmt nicht der Fall. Dies aus der Kernstrahlung herrührenden Verletzungen beruhten auf der Anfangsstrahlung. Die Wirkung der Rückstandsstrahlung in Form radioaktiven Niederschlags war unbedeutend. Wie jedoch in Kapitel IX dargelegt, kann es sich bei Explosion einer Kernwaffe an der Erd- oder Wasseroberfläche ganz anders verhalten.

11.44 Es ist seit langem bekannt, daß durch übermäßige (oder ähnliche) Bestrahlung mit Röntgenstrahlen, Alpha- und Betateilchen, Gammastrahlen und Neutronen, die direkt oder indirekt eine Ionisierung erzeugen können (s. Abschn. 8.22),

lebende Organismen geschädigt werden. Nachdem gegen Ende des 19. Jahrhunderts die Röntgenstrahlen und die natürliche Radioaktivität entdeckt wurden, erlitten Radiologen, bevor man die damit verbundenen Gefahren erkannt hatte, schwere und manchmal sogar tödliche Strahlenschäden. Aber im Laufe der Zeit folgte man den Empfehlungen zur Verhütung übermäßiger Bestrahlungen, und danach nahm die Zahl der Strahlenschäden ab. Dennoch kamen bei Personen, die radiographische Geräte, starke Röntgenapparate in Industrielaboratorien, Zyklotrons und Kernreaktoren bedienten oder mit radioaktiven oder spaltbaren Materialien arbeiteten, gelegentlich übermäßige Bestrahlungen vor.

11.45 Die schädigenden Wirkungen der Strahlen sind wahrscheinlich auf die Ionisierung (und Anregung) der die lebenden Gewebe bildenden Zellen zurückzuführen. Einige ihrer lebenswichtigen Bestandteile werden durch die Ionisierung beschädigt oder zerstört. Außerdem können die sich bildenden Produkte als Zellgifte wirken. Zu den beobachteten Folgen von Kern(oder ionisierenden)Strahlenwirkungen auf Zellen gehören z. B. Chromosomen-Zerfall, Anschwellen des Zellenkerns und der ganzen Zelle, Steigerung des Flüssigkeitsgrades und gesteigerte Durchlässigkeit der Zellenmembran. Dadurch wird der Prozeß der Zellteilung (oder »Mitose«) infolge Bestrahlung verzögert. Häufig sind die Zellen zur Mitose nicht mehr fähig, so daß die normale Zellenenerneuerung im lebenden Organismus gehemmt wird.

11.46 Vor den Atomangriffen in Hiroshima und Nagasaki waren Strahlenverletzungen selten vorgekommen, und man wußte verhältnismäßig wenig über die mit Strahlenschäden verbundenen Erscheinungen. Aber in Japan wurde eine große Zahl von Personen Strahlendosen ausgesetzt, die von unbedeutenden bis zu tödlichen Mengen reichten. Die Wirkungen wurden oft noch durch andere Verletzungen oder Erschütterungen kompliziert, so daß die Symptome der Strahlenerkrankungen nicht immer getrennt festgestellt werden konnten. Außerdem war es bei der großen Anzahl von Patienten und den fehlenden Einrichtungen nach den Explosionen unmöglich, eingehende Beobachtungen anzustellen und genaue Krankheitsberichte zu führen. Dennoch sind aus den japanischen Erfahrungen einige wichtige Schlußfolgerungen hinsichtlich der Wirkungen von Kernstrahlen auf den menschlichen Organismus gezogen worden.

11.47 Seit 1945 sind weitere Erkenntnisse auf diesem Gebiet auch aus anderen Quellen gesammelt worden. Hierzu gehören Tierversuche und einige Unfälle im Laboratorium, von denen ungefähr ein Dutzend Menschen betroffen wurden. Die umfassendsten Erkenntnisse wurden aber auf den Marshall-Inseln durch sorgfältige Untersuchung von mehr als 250 Personen gewonnen, die unvorhergesehenerweise bei der Versuchsexplosion am 1. März 1954 (Abschn. 9.86) Kernstrahlen aus radioaktivem Niederschlag ausgesetzt waren. Zu den Strahlengeschädigten gehörten sowohl Bewohner der Marshall-Inseln als auch eine kleine Gruppe amerikanischer Soldaten. Die auf den ganzen Körper einwirkende Strahlendosis reichte von relativ geringen Mengen, bei denen keinerlei Symptome auftraten (14 r), bis zu Mengen (175 r), die etwas unter denen liegen, welche erwartungsgemäß bei einigen Prozent der Betroffenen zum Tode führen würden.

11.48 Es ist festgestellt worden, daß alle Strahlen, die eine Ionisierung (oder Anregung) auf direktem Wege verursachen können, z. B. Alpha- und Betateilchen, oder auf indirektem Wege, z. B. Röntgenstrahlen, Gammastrahlen und Neutronen, zu Strahlenschäden etwa gleicher Art führen. Aber trotz dieser Gleichartigkeit der Wirkungen unterscheiden sich die verschiedenen Strahlenarten doch in bezug auf ihre Eindringtiefe in den Körper und auf den Grad der Schädigung in Abhängigkeit von der absorbierten Energiemenge. Wie in Abschn. 8.31 ausgeführt, wird dieser Unterschied zum Teil durch den »relativen biologischen Effekt« (oder RBE) ausgedrückt.

11.49 Bei Betateilchen ist dieser »relative biologische Effekt« etwa = 1. Das heißt, daß die Betateilchen bei gleicher in lebendem Gewebe absorbierter Energiemenge im Körper ungefähr den gleichen Grad der Verletzung hervorrufen wie Röntgen- oder Gammastrahlen[1]). Der RBE der Alphateilchen aus radioaktiven Quellen ist verschiedentlich mit 10–20 angegeben, aber das dürfte in den meisten in Frage kommenden Fällen zu hoch angesetzt sein. Bei Neutronen von Atomsprengkörpern wird der RBE für akute Strahlenschäden mit 1,7 angenommen (s. Abschn. 8.69); soweit es sich aber um eine Trübung der Augenlinse (grauen Star) handelt, liegt der RBE merklich höher. Mit anderen Worten: der graue Star wird viel eher durch Neutronen verursacht als durch andere Kernstrahlen.

Die allgemeinen Strahlenwirkungen

11.50 Die Wirkung von Kernstrahlen auf den lebenden Organismus hängt nicht nur von der Gesamtdosis ab, d. h. von der absorbierten Strahlenmenge, sondern auch von der Absorptionszeit, d. h. davon, ob die Strahlung akut oder chronisch einwirkt, ferner von der Fläche und dem Umfang des der Strahlung ausgesetzten Körpers (Abschn. 9.38). Einige der strahlenbedingten Erscheinungen, z. B. die genetischen Wirkungen (s. Abschn. 11.124ff) sind offenbar nur von der empfangenen Gesamtdosis abhängig und nicht von der Zeit der Strahleneinwirkung. Mit anderen Worten: die durch Strahlung verursachten Schäden an den Keimzellen sind kumulativ. In der Mehrzahl der Fälle nimmt jedoch die biologische Wirkung einer bestimmten Gesamtstrahlendosis in dem Maße ab, wie die Bestrahlungszeit abnimmt. So wirken, um einen extremen Fall herauszugreifen, 700 r in einer einzigen Dosis tödlich, sofern der ganze Körper davon betroffen wird; diese Dosis führt aber nicht zum Tode oder hinterläßt keine merklichen äußeren Wirkungen, wenn sie sich über einen Zeitraum von 30 Jahren mehr oder weniger gleichmäßig verteilt.

11.51 Wenn eine kleine, örtliche begrenzte Hautfläche eine Stunde lang einer Dosis von 700 r ausgesetzt wird, tritt eine gewisse Rötung ein. Um jedoch die gleiche sichtbare Wirkung durch zwei kürzere Bestrahlungen zu erreichen, die in einem Abstand von 24 Stunden einwirken, muß jede Dosis ungefähr 535 r

---

[1]) Betateilchen aus Quellen auf dem Körper oder nahe am Körper können auch Hautschäden verursachen (s. Abschn. 11.94).

betragen, so daß insgesamt 1070 r erforderlich sind. Verteilt sich die Bestrahlung über einen Zeitraum von einem Monat, dann kann die zur Erzeugung des gleichen Schädigungsgrades erforderliche Gesamtdosis fast 2000 r betragen. Die Erklärung hierfür liegt darin, daß die Hautzellen sich fortgesetzt sehr schnell erneuern, um der normalen Abnutzung Rechnung zu tragen. Dadurch wird die Mehrzahl der durch Strahlen beschädigten (oder abgetöteten) Zellen durch neue Zellen ersetzt, und es erfolgt zwischen den einzelnen Dosen eine gewisse natürliche Erholung.

11.52 Obgleich in den meisten Fällen die Geschwindigkeit der Bildung neuer Zellen nicht so groß ist wie gerade bei der Haut, so scheinen doch viele Gewebe des Körpers in gewissem Umfange die Fähigkeit zu besitzen, sich von einer Strahleneinwirkung zu erholen. Auch die Erneuerung der reifen Zellen blutbildender Gewebe und der Innenwand des Magendarmkanals geht ebenso wie bei den Samenzellen sehr rasch vor sich.

11.53 Aus Kap. IX geht hervor, daß der menschliche Körper imstande ist, einer dauernden Einwirkung kleinerer Strahlendosen aus natürlichen Quellen ohne irgendwelche schädlichen Folgen zu widerstehen. Wie schon festgestellt, ist dies vermutlich dadurch zu erklären, daß die Mehrzahl der durch energiereiche Strahlen geschädigten Zellen ersetzt wird. Wenn aber der Grad der Strahleneinwirkung hoch oder die Gesamtdosis, die in verhältnismäßig kurzer Zeit aufgenommen wird, groß ist, dann kann die Erholung mit dem Schaden nicht Schritt halten, und dadurch entstehen Strahlenschäden.

11.54 Ob die auf Kernstrahlen zurückzuführenden Schäden heilbar sind oder nicht, scheint weitgehend von der Fähigkeit des betroffenen Organs (oder Organsystems) abzuhängen, sich nach Schäden irgendwelcher Art von selbst wieder zu erholen. Deshalb sind Strahlenschäden am Gehirn und an den Nieren meistens unheilbar, während eine Schädigung des Knochenmarks, des Magendarmkanals und der Haut weitgehend ausgeheilt werden kann.

11.55 Wie bereits ausgeführt, hängen die durch eine bestimmte Strahlendosis verursachten Schäden von der Größe und Art des Körperteils ab, der der Strahlung ausgesetzt war. Eine akute Bestrahlungsdosis von 700 r, die auf eine kleine Stelle einwirkt, kann an der betreffenden Stelle einen beachtlichen biologischen Schaden zur Folge haben, aber der allgemeine Gesundheitszustand muß dabei nicht merklich betroffen sein. Wird hingegen der ganze Körper dieser Dosis von 700 r ausgesetzt, tritt mit Sicherheit der Tod ein. Einer der Gründe für diesen Unterschied liegt darin, daß bei einer begrenzten Bestrahlung die nicht betroffenen Teile des Körpers zur Erholung der verletzten Stelle beitragen können. Ist aber der ganze Körper den Strahlen ausgesetzt, dann sind viele Organe betroffen und der Heilungsverlauf stark beeinträchtigt.

11.56 Die verschiedenen Körperteile sind unterschiedlich strahlenempfindlich, obgleich es, wie später noch dargelegt wird, zweifellos auch noch Schwankungen bei den einzelnen Menschen gibt. Im allgemeinen gehören zu den strahlenempfindlichsten Teilen des Körpers das Lymphgewebe, das Knochenmark, die Milz, die Fortpflanzungsorgane und die Schleimhäute des Magendarmkanals. Eine mittlere Emp-

findlichkeit weisen die Haut, die Lungen, die Nieren und die Leber auf, während die Muskeln und ausgewachsenen Knochen am wenigsten empfindlich sind.

Die Wirkungen akuter Strahlendosen

11.57 Im folgenden Abschnitt werden einige der offensichtlicheren Wirkungen einer akut auf den ganzen Körper einwirkenden Strahlendosis beschrieben. Ein solcher Fall kann eintreten, wenn Menschen der Anfangsstrahlung aus einer Kernexplosion ausgesetzt sind. Die für den Menschen geltenden Ergebnisse in Tabelle 11.57 beruhen sowohl auf Tierversuchen als auch auf Schlußfolgerungen aus Beobachtung an den Menschen, die auf den Marshall-Inseln energiereichen Strahlen ausgesetzt waren. Der Prozentsatz der bei einer bestimmten Dosis auftretenden Todesfälle kann durch unverzügliche ärztliche Behandlung in gewissem Umfange verringert werden. Die in Tabelle 11.57 angeführten Werte sind auch in Bild 11.57 wiedergegeben; die beiden Kurven zeigen den zu erwartenden Prozentsatz der auftretenden Fälle von Strahlenschäden bzw. der dadurch innerhalb von (ungefähr) 30 Tagen ver-

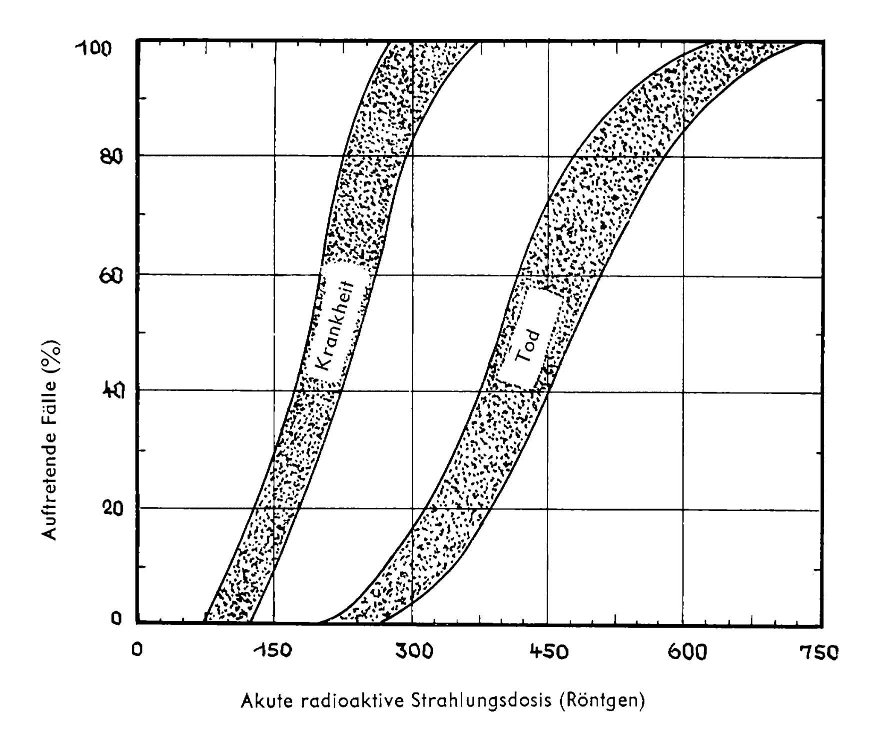


Bild 11.57 *Erkrankungen und Todesfälle auf Grund akut einwirkender Kernstrahlen verschiedener Dosis*

ursachten Todesfälle für verschiedene akut auf den ganzen Körper einwirkende Strahlendosen.

Tabelle 11.57 Die zu erwartenden Wirkungen von akut auf den ganzen Körper einwirkenden Strahlendosen

Dosis (in r)	wahrscheinliche Wirkung
0– 50	Keine offensichtlichen Wirkungen, nur evtl. geringfügige Veränderungen des Blutbildes
80–120	Bei 5–10% der bestrahlten Personen etwa einen Tag lang Erbrechen und Übelkeit, Müdigkeit, aber keine ernsthaften Störungen
130–170	Bei etwa 25% der bestrahlten Personen etwa einen Tag lang Erbrechen und Übelkeit, danach weitere Symptome von Strahlenschäden. Todesfälle nicht zu erwarten
180–220	Bei etwa 50% der bestrahlten Personen einen Tag lang Erbrechen und Übelkeit, danach weitere Symptome von Strahlenschäden, Todesfälle nicht zu erwarten
270–330	Bei fast allen Personen am ersten Tage Erbrechen und Übelkeit, danach weitere Symptome von Strahlenschäden. Zwischen der 2. und 6. Woche nach der Bestrahlung etwa 20% Tote. Die Überlebenden brauchen ungefähr 3 Monate zur Erholung
400–500	Bei allen Personen am ersten Tag Erbrechen und Übelkeit, danach weitere Symptome von Strahlenschäden. Ungefähr 50% Tote innerhalb eines Monats; die Überlebenden brauchen ungefähr 6 Monate zur Erholung
550–750	Bei allen Personen innerhalb der ersten 4 Stunden nach der Bestrahlung Erbrechen und Übelkeit; danach weitere Symptome von Strahlenschäden. Bis zu 100% Todesfälle; die wenigen Überlebenden brauchen ungefähr 6 Monate zur Erholung
1000	Bei allen Personen innerhalb der 1. und 2. Stunde nach der Bestrahlung Erbrechen und Übelkeit. Wahrscheinlich niemand, der die Strahlenschäden überlebt.
5000	Nahezu sofort schwerste Schäden. Alle Betroffenen sterben innerhalb der ersten Woche

11.58 Es ist zu sehen, daß sowohl in Tabelle 11.57 als auch in Bild 11.57 eine bestimmte Wirkung in Abhängigkeit von der Strahlendosis eintritt. Der Grund für diese ungenaue Angabe der Strahlendosis liegt darin, daß viele bekannte und unbekannte Faktoren die Wirkung einer bestimmten Bestrahlungsdosis auf den Körper bestimmen. Zu den individuellen biologischen Schwankungen, von denen noch zu sprechen sein wird, kommen weitere Umstände, z. B. das Alter der bestrahlten Personen und ihr Gesundheitszustand, die Eindringtiefe der Strahlen in den Körper und die die Strahlen absorbierenden Organe, ferner die Richtung der Strahlenquelle zum Körper, wodurch möglicherweise ein Körperteil den anderen abschirmt. Diese

und andere Faktoren beeinflussen die Folgen einer bestimmten Bestrahlungsdosis in Röntgeneinheiten.

11.59 Die unterschiedliche Reaktion der Menschen auf energiereiche Strahlen beruht auf der Tatsache, daß in einer Gruppe von Menschen, die unter den gleichen Bedingungen mit der gleichen Dosis bestrahlt werden, nicht alle in der gleichen Weise reagieren. Zum Beispiel würden voraussichtlich nur 20% der akuten Einwirkung einer Strahlendosis von 300 Röntgen erliegen. Die restlichen 80% würden zwar Strahlenschäden erleiden, sich aber wahrscheinlich wieder erholen. Die unterschiedliche Strahlenwirkung auf die einzelnen Menschen wird der sog. »biologischen Variabilität« zugeschrieben. Dabei handelt es sich um ein Merkmal, das nicht nur für die Wirkungen von Kernstrahlen gilt, sondern auch für andere physiologische Einwirkungen. Das Vorhandensein dieses natürlichen Variabilitätsfaktors erfordert es, sich mit der durchschnittlichen Reaktion einer großen Anzahl von Menschen zu befassen. Es kann nicht vorausgesagt werden, wie ein bestimmter Mensch auf eine bestimmte Strahlendosis reagiert, auch wenn die zu erwartende durchschnittliche Wirkung auf eine große Gruppe unter den genannten Bedingungen bekannt ist.

11.60 Als Anhaltspunkt gilt bei der Betrachtung biologischer Wirkungen von Strahlendosen, die akut den ganzen Körper treffen, gewöhnlich eine Größe, die die »mittlere tödliche Dosis« genannt wird. Die den ganzen Körper erfassende Dosis führt wahrscheinlich innerhalb von etwa einem Monat bei 50% der bestrahlten Personen einer großen Gruppe zum Tode. Die übrigen 50% werden zwar erkranken, sich aber vermutlich im Verlauf von 6 Monaten wieder erholen. Unter Berücksichtigung der oben angeführten Unmöglichkeit einer genauen Dosisfestsetzung wird allgemein angenommen, daß die mittlere tödliche Dosis 450 r beträgt. Diese Ziffer kann sich aber noch ändern, wenn weitere Erkenntnisse über die akute Strahleneinwirkung auf den Menschen vorliegen.

11.61 Kürzlich durchgeführte Untersuchungen im Labor und im Freien lassen darauf schließen, daß es einen einzigen, für alle Bedingungen geltenden Wert für die mittlere tödliche Dosis wahrscheinlich nicht gibt. Zum Beispiel schloß man aus den Beobachtungen über Blutveränderungen bei den Personen, die auf den Marshall-Inseln unvorhergesehenerweise der Strahlung des radioaktiven Niederschlags ausgesetzt waren (s. Abschn. 11.73), daß die mittlere tödliche Dosis etwas weniger als 450 r beträgt. Dagegen ergibt die Überprüfung der in Japan gemachten Feststellungen einen höheren Wert für die mittlere tödliche Dosis Anfangsstrahlung. Obgleich bei beiden Werten möglicherweise beträchtliche Fehler vorliegen, kann der Unterschied auf der Tatsache beruhen, daß sich der radioaktive Niederschlag über ein großes Gebiet ausbreitete, so daß die Strahlung die Personen aus vielen Richtungen traf. Aber bei der Anfangsstrahlung erfolgte die Bestrahlung im wesentlichen aus einer einzigen Richtung, wodurch einige Körperteile durch andere abgeschirmt wurden. Eine bestimmte Röntgendosis würde im ersten Fall mehr Schaden verursachen, wodurch sich ein geringerer Wert für die mittlere tödliche Dosis ergeben würde. Zur Zeit wird ein Wert von 450 r als annehmbarer Durchschnitt angesehen.

Die Merkmale der Erkrankungen durch akut einwirkende Strahlen

Starke Dosis (über 700 r): Überleben ist unwahrscheinlich

11.62 Wird der ganze Körper mit einer sehr großen Dosis, z. B. 5000 r und darüber bestrahlt, so erfolgt sehr schnell eine Schädigung des Zentralnervensystems. Die Symptome sind dann folgende: Übererregbarkeit, Bewegungsstörungen (Versagen der Muskeltätigkeit), Atemnot und zeitweilige Benommenheit. Nach einer solchen akut einwirkenden hohen Bestrahlung verliert der Körper fast sofort seine Funktionsfähigkeit, und der Tod tritt mit Gewißheit in einem Zeitraum von einigen Stunden bis ungefähr einer Woche ein. Liegt die Dosis bei etwa 700 bis 1000 r, dann zeigen sich die ersten schweren Schäden im Magendarmkanal in Form von Übelkeit und Erbrechen schon innerhalb der ersten 3 oder 4 Stunden. Je größer die Dosis ist, um so eher treten diese Symptome in Erscheinung. Auf sie folgen dann mehr oder weniger schnell Mattigkeit, Durchfall, Appetitlosigkeit und Widerwillen gegen Speisen und Fieber. Wie nach den Atomangriffen auf Japan festgestellt wurde, trat der Durchfall häufig und in schwerer Form auf; er war zunächst wässerig und später blutig.

11.63 Je schneller sich die vorstehend genannten Symptome der Strahlenschäden entwickeln, um so wahrscheinlicher ist es, daß sie bald zum Tode führen. Obwohl die Patienten während der ersten Tage keine Schmerzen haben, fühlen sie sich doch unwohl oder unpäßlich, daneben leiden sie unter starken Depressions- und körperlichen Ermüdungserscheinungen. In manchen Fällen geringerer Dosisaufnahme folgt auf die ersten Stadien einer schweren Strahlenerkrankung eine sog. »Latenz«-Zeit von 2 bis 3 Tagen (oder mehr), während derer der Patient frei von Symptomen zu sein scheint, obwohl sich in seinem Körper, besonders in den blutbildenden Geweben, große Veränderungen vollziehen. Dann folgt ein erneutes Auftreten der früheren Symptome, die oft von Delirium oder Koma begleitet sind, denen der Tod gewöhnlich innerhalb von zwei Wochen ein Ende setzt.

11.64 Weitere beobachtete Symptome sind eine sekundäre Infektion und gegen Ende der ersten Woche eine Neigung zu plötzlichen Blutungen. Gleichzeitig kommen nicht selten Anschwellen und Entzündung des Rachens vor. Haarausfall, hauptsächlich am Kopf, tritt gewöhnlich am Ende der zweiten Woche auf. Die schweren Strahlenerkrankungen waren bei den Japanern von einer Erhöhung der Körpertemperatur begleitet. Im allgemeinen erfolgte zwischen dem 5. und 7. Tag, manchmal aber schon am 3. Tag nach der Bestrahlung eine schrittweise Temperatursteigerung, die gewöhnlich bis zum Tag des Todes anhielt. Auch das Blutbild des Patienten hatte sich auffallend verändert; davon wird noch später zu sprechen sein (Abschn. 11.73). Eine Untersuchung nach dem Tod ergab verkleinerte und degenerativ veränderte Hoden und Eierstöcke. In einigen Fällen konnte auch ein Eitern der Mandeln und der Schleimhäute des Dickdarms beobachtet werden.

Dosis von 300–500 r: Überleben ist möglich

11.65 In einem Dosisbereich von ungefähr 300–500 r, in dem es zwar möglich, aber keinesfalls gewiß ist, daß der Patient am Leben bleibt, sind die Anfangssymptome denen ähnlich, die die Folge etwas stärkerer Dosen sind, nämlich Übelkeit, Erbrechen, Durchfall, Appetitlosigkeit und Unpäßlichkeit. Aber diese Symptome entwickeln sich später, wenn auch meist noch am Tage der Bestrahlung und sind weniger schwer. Nach dem ersten und zweiten Tag verschwinden die Symptome wieder, und es tritt eine Latenzzeit ein, die von mehreren Tagen bis zu zwei Wochen dauern kann; in dieser Zeit fühlt sich der Patient verhältnismäßig gut, obwohl in seinem Blut wichtige Veränderungen vor sich gehen. Später treten die Symptome wieder auf und bringen, wie oben schon erwähnt, Fieber, Durchfall und einen schrittweisen Anstieg der Temperatur mit sich.

11.66 Ungefähr zwei oder drei Wochen nach der Bestrahlung beginnen verschiedene Organe, Neigung zu Blutungen zu zeigen, und es werden auch Blutungen unter der Haut beobachtet. Besonders häufig tritt plötzliches Bluten der Mundhöhle und der Wände des Darmkanals auf. Möglicherweise findet sich im Urin Blut aus den Nieren oder aus dem Harnleiter, der aus der Niere herausführt. Diese Neigung zu Blutungen ist in der Hauptsache durch den Entzug gewisser Bestandteile des Blutes bedingt, der zu Störungen des komplizierten Blutgerinnungsvorgangs führt (siehe Abschn. 11.79). Der Haarausfall, der für die Strahleneinwirkung sehr charakteristisch ist, beginnt ebenfalls nach ungefähr zwei Wochen, d. h. unmittelbar nach Ablauf der Latenzzeit.

11.67 Ein sehr erschwerender Faktor ist die Empfindlichkeit gegen Infektion von Wunden, Verbrennungen und anderen Verletzungen. Diese Empfindlichkeit rührt weitgehend aus dem Verlust weißer Blutkörperchen und einem merklichen Nachlassen im normalen immunologischen Verhalten des Körpers her. Zum Beispiel beginnt nach der Latenzzeit eine Geschwürsbildung um die Lippengegend, die sich im Endstadium der Erkrankung vom Munde her über den ganzen Magendarmkanal ausbreitet. Infolge der Vermehrung der Bakterien, die durch die Verminderung der weißen Blutkörperchen ermöglicht wird, kann sich eine umfassende Infektion entwickeln.

11.68 Bei den schweren Fällen in Japan, die einer ziemlich großen Strahlendosis ausgesetzt waren, kam es zu einer von Fieber und Delirium begleiteten schweren Abmagerung, auf die 2–12 Wochen nach der Bestrahlung der Tod folgte. Diejenigen Patienten, die 3–4 Monate überstanden und keiner Tuberkulose, Lungenentzündung oder anderen Komplikationen erlagen, erholten sich nach und nach. Ein dauernder Haarausfall wurde nicht beobachtet; die Untersuchung von 824 Überlebenden drei bis vier Jahre später ergab, daß die Zusammensetzung des Blutes nicht wesentlich anders war als bei einer untersuchten Gruppe aus einer Stadt, die keinen Atomangriff miterlebt hatte. Das Auftreten langanhaltender Wirkungen, wie grauer Star und Leukämie, wird weiter unten erörtert.

Dosen von 100–250 Röntgen: Überleben ist wahrscheinlich

11.69 Wird der ganze Körper einer Strahlendosis ausgesetzt, die zwischen 100 und 250 r liegt, so entstehen in gewissem Umfange Schäden, die sich aber wahrscheinlich als tödlich erweisen. Dosen dieser Stärke traten in Hiroshima und Nagasaki besonders bei Personen auf, die sich in einigem Abstand von der Kernexplosion befanden. Von den 250 Personen, die unvorhergesehenerweise nach der Versuchsexplosion am 1. März 1954 auf den Marshall-Inseln dem radioaktiven Niederschlag ausgesetzt waren, erhielten 64 eine Strahlendosis dieser Größenordnung. Zu erwähnen ist, daß die Bewohner der Marshall-Inseln nicht eigentlich eine akute Bestrahlung erlitten, wie in Abschn. 9.38 etwas willkürlich angegeben, denn die Bestrahlung dehnte sich über 45 Stunden aus. Mehr als die Hälfte der Dosis wurde jedoch innerhalb von 24 Stunden empfangen; die beobachteten Wirkungen waren zweifellos denen ähnlich, die bei einer akuten Bestrahlung gleicher Intensität zu erwarten ist.

11.70 Die Schäden durch Strahlendosen von 100 bis 250 r weisen das gleiche Gesamtbild auf wie bei stärkerer Bestrahlung, nur ist der Ausbruch der Erkrankungen weniger plötzlich, und die Symptome sind weniger ausgeprägt. Etwa am ersten Tage nach der Bestrahlung treten gewöhnlich Übelkeit, Erbrechen und Durchfall auf, dann folgt eine praktisch symptomfreie Latenzzeit von zwei Wochen und darüber. Während dieser Zeit ist der Patient durch die Krankheit nicht arbeitsunfähig geworden; er kann vielmehr seiner regelmäßigen Beschäftigung nachgehen. Danach treten die üblichen Symptome, wie Appetitlosigkeit, Unpäßlichkeit, Haarausfall, Durchfall und Neigung zu Blutungen erneut auf, sind aber dann nicht mehr sehr stark ausgeprägt (Bild 11.70).

Die Veränderungen des Blutes als Folge der Strahlenschäden werden während der Latenzzeit bedeutsam und halten eine gewisse Zeit an. Wenn keine Komplikationen auf Grund anderer Verletzungen oder Infektionen eintreten, erfolgt in nahezu allen Fällen eine Erholung; nach ungefähr 2 Monaten fängt das Haar wieder an zu wachsen. Im allgemeinen gilt, daß der Erholungsprozeß um so länger dauert und schwieriger ist, je schwerer die Anfangsstadien der Strahlenerkrankung sind. Eine entsprechende Pflege und evtl. ärztlich verordnete Antibiotika können die vollständige Erholung der schwereren Fälle außerordentlich beschleunigen.

Kleine Dosis: Geringfügige Schäden

11.71 Einzelne Bestrahlungen des ganzen Körpers von 25–100 r können schwache und wenig charakteristische Symptome verursachen, oder es erfolgen lediglich Blutveränderungen, die – in geringem Umfang – auch nach Dosen beobachtet wurden, die nicht größer als 14 r waren. Eine schwere Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes liegt im allgemeinen nicht vor, die bestrahlten Personen können regelmäßig ihrer üblichen Arbeit nachgehen.

Zusammenfassung der Krankheitssymptome der Strahlenschäden

11.72 Die deutlichsten und ersten Symptome eines Strahlenschadens sind Übelkeit, Erbrechen und Durchfall. Das Auftreten, die Schwere und die Dauer dieser Symptome stehen in direktem Verhältnis zum Ausmaß der Bestrahlung und im umgekehrten Verhältnis zur Wahrscheinlichkeit einer Erholung. Der Beginn und die Dauer der auf die ersten Symptome folgenden Latenzzeit und der weiteren Wirkungen stehen ebenfalls zu diesen Faktoren in Beziehung. Eine vereinfachte Zusammenfassung der Krankheitssymptome von Strahlenschäden ist, in drei verschiedene Schweregrade eingeteilt, in Tabelle 11.72 enthalten. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Zeitskala nur angenähert ist und daß die Reihenfolge des Auftretens der verschiedenen Symptome nach Ablauf der Latenzzeit sowie die Symptome selbst von Fall zu Fall verschieden sein können.

Die Strahlenwirkungen auf die Bestandteile des Blutes

11.73 Wenn der ganze Körper einer einzigen Dosis Kernstrahlen ausgesetzt wird, dann sind die Veränderungen im Blut vielleicht die augenfälligsten und charakteristischsten der biologischen Folgeerscheinungen. Derartige Veränderungen sind in

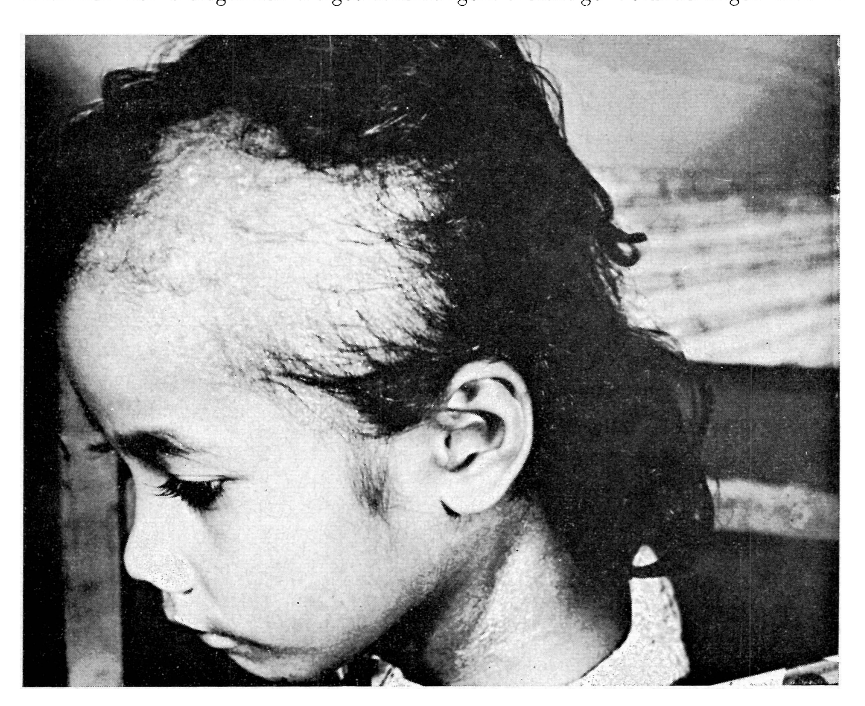


Bild 11.70 Haarausfall bei einem Kind, das etwa 175 r Gammastrahlen ausgesetzt war.

Tabelle 11.72 Zusammenfassung der Krankheitssymptome von Strahlenschäden

Zeit nach der Bestrahlung	Überleben unwahrscheinlich (700 r oder darüber)	Überleben möglich (550–300 r)	Überleben wahrscheinlich (250–100 r)
1. Woche	Übelkeit, Erbrechen und Durchfall in den ersten Stunden	Übelkeit, Erbrechen und Durchfall in den ersten Stunden	möglicherweise Übelkeit, Erbrechen und Durchfall am ersten Tag
	in manchen Fällen keine bestimmten Symptome (Latenzzeit)		
	Durchfall, punkt- und flächenförmige Blutungen, Entzündung von Mundhöhle und Rachen, Fieber	keine bestimmten Symptome (Latenzzeit)	keine bestimmten Symptome (Latenzzeit)
2. Woche	schneller Gewichtsverlust, Tod (die Sterblichkeit ist wahrscheinlich 100%)	Haarausfall, Appetitlosigkeit und allgemeine Unpäßlichkeit, Fieber	
3. Woche		punktförmige Blutungen, flächenförmige Blutungen, Nasenbluten, Blässe, Entzündung von Mundhöhle und Rachen, Durchfall, Gewichtsverlust	Haarausfall, Appetitlosigkeit und Unpäßlichkeit, Halsschmerzen, Blutungen, flächenförmige Blutungen, Blässe, Durchfall, leichter Gewichtsverlust
4. Woche		Tod in den schwersten Fällen (Sterblichkeit 50% bei 450 r)	Erholung in etwa 3 Monaten wahrscheinlich, sofern auf Grund früher schon schwachen Gesundheitszustands oder eintretender Verletzungen oder Infektionen *keine* Komplikationen eintreten

geringem Umfange bereits bei einer Gruppe von Personen beobachtet worden, die nur mit 14 r bestrahlt worden waren. Bei stärkerer Dosis treten sie deutlich in Erscheinung. Aus der Kernexplosion in Japan und aus Beobachtungen der Opfer von Laborunfällen wurden viele Erkenntnisse über die Reaktion des menschlichen Blutes auf Kernstrahlen gewonnen. Die Ereignisse im März 1954 auf den Marshall-Inseln boten Gelegenheit zu einer sehr gründlichen Untersuchung der Wirkungen kleinerer und mittlerer Strahlendosen bis zu 175 r auf das menschliche Blut. Die nachstehenden Ausführungen, die im allgemeinen mit den in Japan beobachteten Ergebnissen übereinstimmen, bauen sich weitgehend auf dieser Untersuchung auf.

11.74 Eine der auffallendsten Blutveränderungen bei Strahlenschäden ist die der Leukozyten-(weiße Blutkörperchen) Zahl. Die Leukozyten sind diejenigen Zellen, die das Eindringen von Bakterien in den Körper verhindern. Man hat beobachtet, daß die Zahl der weißen Blutkörperchen bei einer Infektion rasch zunimmt, wenn sie die eindringenden Bakterien bekämpfen müssen. Der Verlust der Fähigkeit, diesem Eindringen von Bakterien auf Grund von Strahlen oder anderen Verletzungen Widerstand zu leisten, ist eine ernste Sache, denn die Bakterien, die sonst von den weißen Blutkörperchen aufgenommen werden, können sich dann

schnell vermehren und schwerwiegende Folgen nach sich ziehen. Es gibt mehrere Arten von Leukozyten, die verschiedene Sonderfunktionen haben; aber sie alle besitzen die Eigenschaft, Infektionen Widerstand zu leisten und Giftstoffe aus dem Körper zu beseitigen. Die Leukozyten werden nach ihrem Aussehen bezeichnet, z. B. als Granulozyten, oder nach ihrem Ursprung, z. B. als Lymphozyten, oder nach ihrer Säurebasenverwandtschaft, z. B. als Acidophile, Neutrophile oder Basophile.

11.75 Nachdem der Körper einer nicht tödlichen Strahlendosis, d. h. ungefähr 250 r oder weniger, ausgesetzt war, steigt die Gesamtzahl der Leukozyten im Verlauf der ersten zwei Tage steil an und sinkt dann unter das normale Maß ab. Die Zahl der weißen Blutkörperchen schwankt während der nächsten 5 oder 6 Wochen, ohne dabei ein bestimmtes Minimum zu erreichen. Im Verlauf dieser Schwankungen kann gelegentlich ein Ansteigen über das normale Maß hinaus erfolgen. Während der 7. oder 8. Woche stellt sich die Zahl der weißen Blutkörperchen auf eine niedrigere Basis ein und erreicht etwa um diese Zeit ihr Minimum. In den folgenden Wochen ist eine ansteigende Tendenz zu beobachten, aber eine vollständige Erholung kann mehrere Monate oder noch längere Zeit erfordern.

11.76 Die Neutrophile, die den Körper gegen die eindringenden Bakterien schützen, bilden sich hauptsächlich im Knochenmark. Ihre Anzahl ist normalerweise ebenso groß wie die der übrigen weißen Blutkörperchen, so daß die anfängliche Zunahme der letzteren offensichtlich auf das verstärkte Auftreten der Neutrophile zurückzuführen ist. Es vergehen mehrere Monate, bevor die Neutrophile wieder auf ihre normale Zahl abgesunken sind.

11.77 Im Gegensatz zu den Neutrophilen sinkt die Zahl der Lymphozyten, die im Lymphgewebe des Körpers, z. B. in den Lymphknoten und in der Milz erzeugt werden, bald nach der Bestrahlung stark ab. Sie bleibt auch weiterhin für mehrere Monate beträchtlich unter dem normalen Wert; eine Wiederherstellung kann viele Monate oder sogar Jahre dauern. Aber nach den in Japan gemachten Beobachtungen ergab die Zahl der Lymphozyten bei Personen, die der Strahlung ausgesetzt waren, 3 oder 4 Jahre nach der Bestrahlung keinen nennenswerten Unterschied mehr im Vergleich zu nicht bestrahlten Personen.

11.78 Wie oben gesagt, besteht die Aufgabe der weißen Blutkörperchen darin, den Körper gegen Infektionen zu schützen und Giftstoffe zu beseitigen. Wenn das Knochenmark und das Lymphgewebe infolge der Strahlenwirkung bei der Bildung von Granulozyten bzw. Lymphozyten versagen, dann bedeutet das, daß ein wichtiger Schutzmechanismus des Körpers weitgehend unwirksam geworden ist. Darin ist teilweise der Grund für die oben erwähnte erhöhte Infektionsempfänglichkeit zu suchen, die eine Begleiterscheinung der Strahlenschäden ist. Hierzu tragen noch weitere Faktoren bei, z. B. die mangelhafte Fähigkeit, Schutzstoffe zu erzeugen sowie die gestörte Funktion der restlichen Lymphozyten.

11.79 Eine weitere bedeutsame Blutveränderung wirkt sich bei den Blutplättchen aus; diese sind ein Bestandteil des Blutes und spielen im Zusammenhang mit der Blutgerinnung eine wichtige Rolle. Im Gegensatz zur schwankenden Zahl der weißen Blutkörperchen nimmt die Zahl der Blutplättchen nach Bestrahlung stän-

dig ab und erreicht bei einer nichttödlichen Dosis ungefähr nach einem Monat ihr Minimum. Bei größeren Strahlendosen nimmt die Zahl der Blutplättchen schneller ab und erreicht in noch kürzerer Zeit ein tiefliegendes Minimum. Auf diese zahlenmäßige Abnahme der Blutplättchen folgt ein teilweiser Wiederanstieg, jedoch wird die normale Anzahl erst mehrere Monate oder sogar Jahre nach der Bestrahlung wieder erreicht. Diese Abnahme der Blutplättchenzahl erklärt zum Teil das Auftreten von punkt- und flächenförmigen Blutungen als Folgeerscheinung einer Strahleneinwirkung.

11.80 Die Zahl der Erythrozyten (roten Blutkörperchen) verringert sich nach der Bestrahlung ebenfalls; es kommt zu anämischen Erscheinungen, z. B. Hautblässe. Aber die Veränderung der Zahl der Erythrozyten ist viel weniger auffallend als bei den weißen Blutkörperchen und Blutplättchen, besonders bei Bestrahlungen zwischen 200 und 400 r. Während diese Zellen schnell reagieren, zeigt die Zahl der roten Blutkörperchen mehrere Tage hindurch nur eine geringe oder auch gar keine Veränderung. Dann erfolgt eine Abnahme, die etwa 2–3 Wochen anhält; sie wird bei den überlebenden Personen von einem langsamen Ansteigen abgelöst.

11.81 Als Anhaltspunkt für die Schwere einer Bestrahlung, besonders bei nichttödlicher Dosis, ist die Zahl der gesamten weißen Blutkörperchen oder die der Neutrophilen nur von begrenztem Wert, weil diese Zahl sehr schwankt und überdies mehrere Wochen vergehen können, bevor eine Abnahme beobachtet wird. In dieser Hinsicht ist die Zahl der Lymphozyten – besonders bei geringerer Dosis – von größerem Wert, weil hier bereits innerhalb von einigen Stunden nach der Bestrahlung eine zahlenmäßige Verringerung eintritt. Eine deutliche Abnahme der Lymphozytenzahl erfolgt schon bei geringer Dosis. Bei größeren Dosen ist der Unterschied relativ gering. Deshalb ist die Zahl der weißen Blutkörperchen als Anhaltspunkt für eine stattgefundene Bestrahlung im stärkeren Dosisbereich nicht sehr zweckmäßig.

11.82 Die Veränderung der Zahl der Blutplättchen scheint dagegen eine gewisse Regelmäßigkeit aufzuweisen; das tiefste Absinken wird bei den Bestrahlungen im nichttödlichen Dosisbereich nahezu zur selben Zeit wie bei den Lymphozyten erreicht. Außerdem ist der Grad der Verringerung des normalen Wertes in diesem Bereich ungefähr proportional zur geschätzten Dosis. Es ist deshalb in Erwägung gezogen worden, die Zahl der Blutplättchen als eine zweckmäßige und verhältnismäßig einfache, direkte Methode gelten zu lassen, um die Schwere eines Strahlenschadens im nichttödlichen Bereich festzustellen. Ein ins Gewicht fallender Nachteil ist allerdings, daß eine nennenswerte Abnahme der Zahl der Blutplättchen erst einige Zeit nach Bestrahlung in Erscheinung tritt.

Nachwirkungen der Kernstrahlung

Grauer Star

11.83 Einige Folgeerscheinungen der Kernstrahlung machen sich unter Umständen erst mehrere Jahre nach der Bestrahlung bemerkbar. Hierzu gehören außer den genetischen Wirkungen der graue Star, Leukämie und Entwicklungsstörungen bei Kindern, die sich zur Zeit der Explosion noch im Mutterleib befanden. Erkenntnisse über diese Strahlennachwirkungen sind in Japan laufend in durchgeführten Untersuchungen hauptsächlich unter der Leitung der »Atomic Bomb Casualty Commission«[1]) gewonnen worden.

11.84 Eine Untersuchung über das Auftreten von grauem Star bei den Überlebenden der Atomangriffe auf Hiroshima und Nagasaki ergab weit über 100 Fälle von Linsentrübungen ohne Beeinträchtigung der Sehkraft bei den Personen, die sich zur Zeit der Explosion in einer Entfernung von etwa 1 km vom Nullpunkt befunden hatten. Nur bei einem geringen Prozentsatz der Patienten war die Trübung so schwer, daß eine Operation erforderlich wurde. Die Fälle von grauem Star hatten Ähnlichkeit mit denen, die vorher bei übermäßiger Röntgen- oder Gammabestrahlung aufgetreten waren; sie sind also wohl auf die Anfangsstrahlung aus den Atomsprengkörpern zurückzuführen. Wegen der starken biologischen Wirksamkeit der schnellen Neutronen in bezug auf das Entstehen von Linsentrübungen (Abschn. 11.49) ist es wahrscheinlich, daß diese Strahlung größtenteils die Ursache für die in Japan aufgetretenen Fälle von grauem Star war.

11.85 Der größte Teil der Personen, die sich im gleichen Entfernungsbereich vom Explosionszentrum aufgehalten hatten, starben entweder an Wärmeschäden oder Verletzungen durch mechanische Wirkungen oder an Strahlenschäden. Wahrscheinlich haben also alle (oder fast alle) Überlebenden, bei denen später Fälle von grauem Star auftraten, mindestens eine mittlere Strahlendosis empfangen. Diese Auffassung wird durch die Tatsache bestärkt, daß fast alle diese Personen ihr Haar (vorübergehend) völlig verloren und viele andere die charakteristischen Symptome der Strahlenkrankheit aufwiesen.

Leukämie

11.86 Eine Überprüfung der Sterblichkeitsziffer hat gezeigt, daß die Leukämie eine Krankheit ist, die mit der Bildung von zu vielen weißen Blutkörperchen zusammenhängt. Als Todesursache tritt sie bei den Röntgenologen sehr viel häufiger auf als bei anderen Ärzten. Man hat daher angenommen, daß die andauernde Einwirkung einer mittleren Dosis Kernstrahlung zur Leukämie führt. Nach einer Unter-

[1]) Die »Atomic Bomb Casualty Commission« des US. National Research Council arbeitet im Auftrag der Atomenergiekommission. Eines ihrer Ziele ist, die langanhaltenden Wirkungen der Kernstrahlung zu untersuchen.

suchung der Überlebenden der Kernexplosionen über Japan hat es jetzt aber den Anschein, daß diese Krankheit aus einer einzigen großen, akut einwirkenden Strahlendosis herrühren kann. Den ersten deutlichen Beweis einer Zunahme der Leukämiefälle bei der Bevölkerung von Hiroshima und Nagasaki erhielt man im Jahre 1947. Es vergingen also mindestens zwei Jahre zwischen der Bestrahlung und dem Auftreten der Symptome. Die Zahl der neugemeldeten Fälle hat in den folgenden Jahren ziemlich regelmäßig zugenommen.

11.87 Fast alle Leukämiefälle, die auf Grund der sonstigen Symptome, z. B. Haarausfall, der Strahlung zugeschrieben werden konnten, traten bei Personen auf, die sich während der Explosion in einer Entfernung von etwa 1400 m vom Nullpunkt befunden hatten. In diesem Entfernungsbereich muß die Mindeststrahlendosis, die die Betreffenden vermutlich über eine ausgedehnte Körperpartie aufgenommen haben, die mittlere tödliche Dosis von 450 r fast erreicht haben. Ein Überblick über einen großen Teil dieser Patienten zeigte, daß die Leukämie unter den Überlebenden durchschnittlich in einem Verhältnis von etwa 1 zu 500 auftrat, während dieses Verhältnis bei der übrigen, nicht der Strahlung ausgesetzten japanischen Bevölkerung bei 1 zu 50000 liegt.

Entwicklungsstörungen bei Kindern

11.88 Unter den werdenden Müttern, die bei den Kernexplosionen in Japan so starken Strahlungsdosen ausgesetzt waren, daß die üblichen Bestrahlungssymptome auftraten, lagen die Zahl der Totgeburten und die Sterblichkeit der Neugeborenen und Säuglinge weit über dem Durchschnitt. Die 4 oder 5 Jahre später vorgenommene Untersuchung der am Leben gebliebenen Kinder zeigte eine leichte Zunahme der Anzahl der geistig Zurückgebliebenen. Aber nahezu alle Mütter dieser damals empfangenen, aber noch ungeborenen Kinder befanden sich so nahe am Nullpunkt, daß sie einer Kernstrahlung von mindestens 450 r ausgesetzt gewesen sein müssen. Ebenso wurde eine schlechte Entwicklung der Zähne auf Grund von Zahnwurzelschäden bei vielen Kindern festgestellt.

11.89 Ein etwa um 1952 angestellter Vergleich zwischen den von Strahlen getroffenen Kindern, deren Alter zur Zeit der Explosion weniger als 1 Jahr bis ungefähr 14 Jahre betrug, und den nicht von Strahlen getroffenen Kindern im gleichen Alter ergab, daß das durchschnittliche Körpergewicht der ersteren etwas niedriger lag und daß ihr Körper und ihre Sexualreife weniger weit entwickelt waren. Dagegen wurden bei verschiedenen neuromuskulären Koordinations- und Muskeltesten keine wesentlichen Unterschiede beobachtet.

11.90 Im Zusammenhang mit der Frage der Entwicklung der Kinder ist zu erwähnen, daß die in Japan nach den Atomangriffen von bestrahlten Eltern gezeugten Kinder ganz normal zu sein scheinen. Die gelegentlich ausgesprochene Sorge, daß die Häufigkeit der Abnormitäten scharf ansteigen würde, hat sich nicht bewahrheitet (s. hingegen Abschn. 11.124).

Die Auswirkung der Strahlen auf andere Verletzungen

11.91 Es ist anzunehmen, daß die zweifache Schädigung des Körpers, nämlich durch Strahlen und durch sonstige Verletzungen, zu einem Anwachsen der Zahl der Schockfälle führt. So wird z. B. bei Zusammenwirken einer nichttödlichen Strahlendosis und mittlerer Verbrennungen durch Wärme ein Schock eher und schwerer auftreten, als wenn es sich um die betreffenden Verbrennungen allein handelt. Wegen der mit Strahlenschäden verbundenen Empfindlichkeit gegen sekundäre Infektionen und auch aus anderen Gründen wird die Heilung aller Arten von Wunden verzögert. Infektionen, die der Körper normalerweise bewältigen würde, können sich in solchen Fällen sogar als tödlich erweisen.

Die Gefahren der Rückstandsstrahlung

Gammastrahlen

11.92 Im allgemeinen sind die biologischen Wirkungen der Rückstandsstrahlung ähnlich wie die der Anfangsstrahlung, jedoch erfordern einige Gesichtspunkte, die sich aus der Art der Spaltungsprodukte und dem radioaktiven Niederschlag ergeben, besondere Aufmerksamkeit. Die hier zu erörternden Themen betreffen 1. die Rückstandsgammastrahlung, 2. die Betateilchenstrahlung und 3. die inneren Strahlungsquellen.

11.93 Obwohl die aus Spaltungsprodukten herrührenden Gammastrahlen weniger Energieinhalt und etwas weniger Eindringtiefe haben als die der Anfangsstrahlung, sind ihre biologischen Wirkungen doch ähnlich. Aber eine bestimmte Röntgendosis an Rückstandsgammastrahlung aus radioaktivem Niederschlag kann, wie schon in Abschn. 11.61 gesagt, zu größeren biologischen Schäden führen als die gleiche Röntgendosis Anfangsgammastrahlung. Im letzteren Fall kann, wenn der größte Teil der Strahlung aus einer einzigen Richtung kommt, nämlich aus der Richtung des explodierenden Atomsprengkörpers, ein Teil des Körpers von einem anderen Körperteil teilweise abgeschirmt werden. Die Strahlung aus radioaktivem Niederschlag hingegen kann den Körper aus vielen Richtungen treffen, und es besteht nur eine geringe Möglichkeit der Selbstabschirmung. Die Tatsache, daß sich die Rückstandsstrahlung über eine längere Zeit erstreckt als die Anfangsstrahlung, ist nicht sehr bedeutsam, weil der größte Teil der Strahlendosis aus radioaktivem Niederschlag im allgemeinen während des ersten oder zweiten Tages nach der Kernexplosion einwirkt. In dieser Zeit kann sich der Körper nicht nennenswert von der Strahleneinwirkung erholen, so daß die Dosis im wesentlichen als akut einwirkend betrachtet werden kann.

Strahlung aus Betateilchen

11.94 Körperschäden durch Betateilchen einer äußeren Quelle können auf zweierlei Weise entstehen. Wenn die Betateilchen-Strahlenquelle, z. B. die Spaltungsprodukte des radioaktiven Niederschlags, in direkte Berührung mit der Haut kommen und dort eine längere Zeit verbleiben, dann entstehen Strahlenschäden, die manchmal als Betaverbrennungen bezeichnet werden. Außerdem wird in einem ausgedehnten Gebiet radioaktiven Niederschlags die ganze Körperoberfläche den aus vielen Richtungen kommenden Betateilchen ausgesetzt. Die Kleidung schwächt diese Strahlen zwar in größerem Umfange ab, aber die äußeren Hautschichten können doch einer großen Dosis durch Betateilchen ausgesetzt werden, und manchmal können dadurch schwere Verbrennungen entstehen.

11.95 Wertvolle Erkenntnisse über die Entstehung und Heilung von Betaverbrennungen sind aus Beobachtungen der Bewohner der Marshall-Inseln gewonnen worden, die im März 1954 radioaktiven Niederschlag ausgesetzt waren. Auf einigen dieser Inseln begannen ungefähr innerhalb von 5 Stunden nach der Explosion radioaktive Stoffe zu fallen. Obgleich dieser radioaktive Niederschlag als weißes Pulver zu sehen war, das weitgehend aus Kalkteilchen (Kalziumoxyd) bestand, die aus der Auflösung der Korallenriffe (Kalziumkarbonat) infolge der Wärmeeinwirkung herrührten, erkannten die Inselbewohner seine Bedeutung nicht. Da das Wetter heiß und dunstig war, blieben die Bewohner im Freien; ihre Körper waren feucht und verhältnismäßig wenig bekleidet. Dadurch fielen ihnen größere Mengen an Spaltungsprodukten auf Haar und Haut und blieben dort längere Zeit haften. Da die Insel-

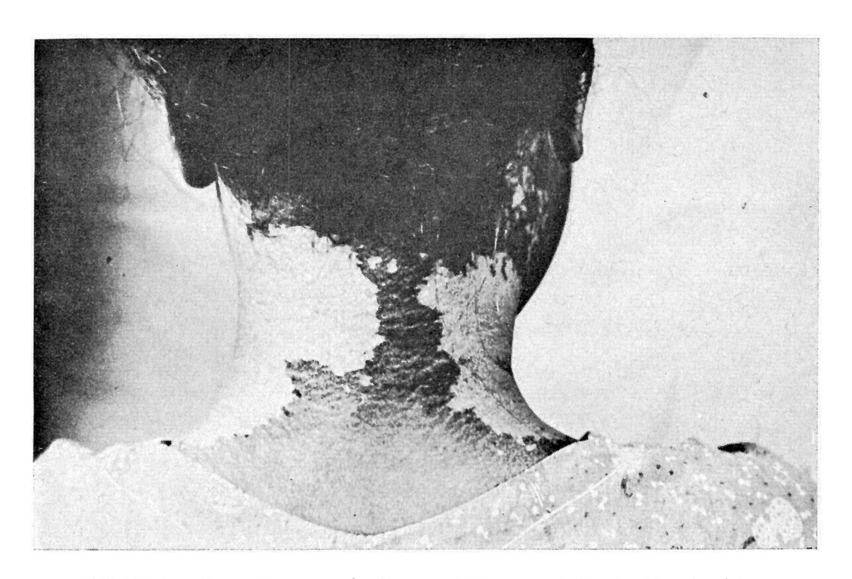


Bild 11.97a Betaverbrennung im Nacken 1 Monat nach der Strahleneinwirkung

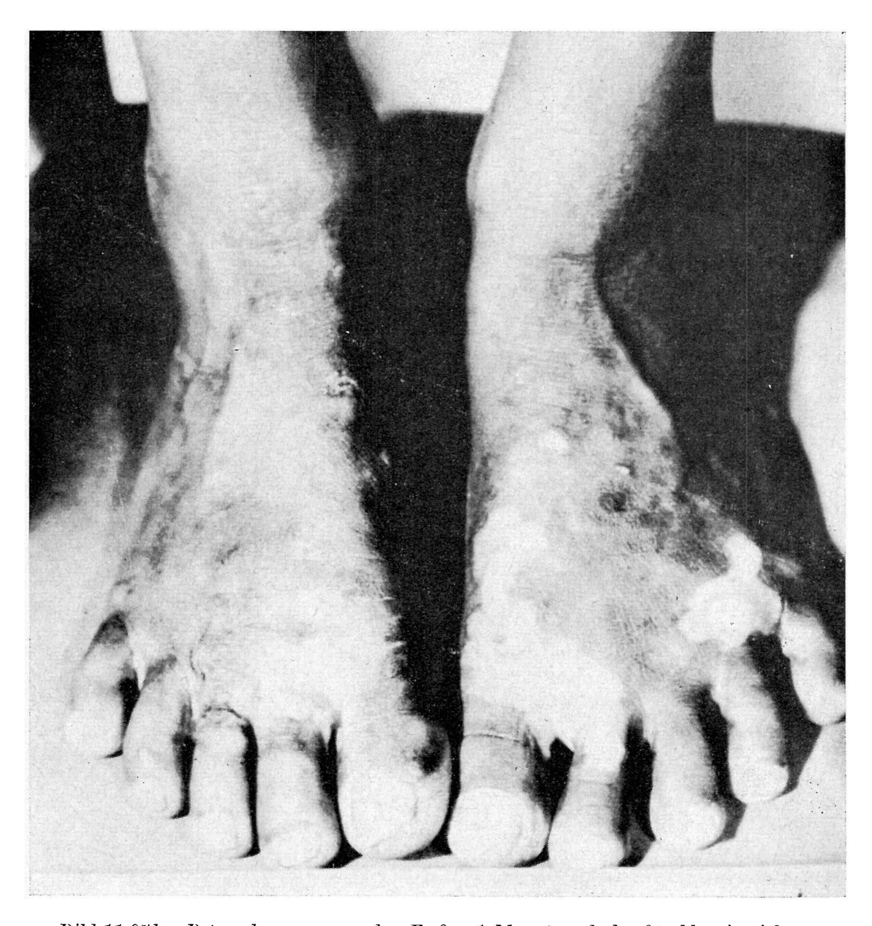


Bild 11.97b Betaverbrennung an den Füßen 1 Monat nach der Strahleneinwirkung

bewohner in der Regel keine Schuhe tragen, waren ihre bloßen Füße fortgesetzt der Einwirkung der Spaltungsprodukte am Erdboden ausgesetzt.

11.96 Während der ersten 24–48 Stunden litt eine Anzahl von Personen aus der Reihe der stärker Betroffenen an Juckreiz und einem brennenden Gefühl auf der Haut. Diese Symptome waren bei denen, die durch die Spaltungsprodukte weniger beeinträchtigt waren, nicht so ausgeprägt. Innerhalb von 1–2 Tagen ließen diese Symptome auf der Haut nach und verschwanden, aber nach ungefähr 2–3 Wochen traten Haarausfall und Hautschäden an den Körperteilen auf, die durch die radioaktiven Niederschlagsteilchen geschädigt waren. Es trat offenbar weder im Anfangsstadium noch in den späteren Stadien eine abnorme Hautschädigung auf, wie man das hätte erwarten können, aber sie war vielleicht nur wegen der natürlichen Hautfärbung nicht sichtbar.

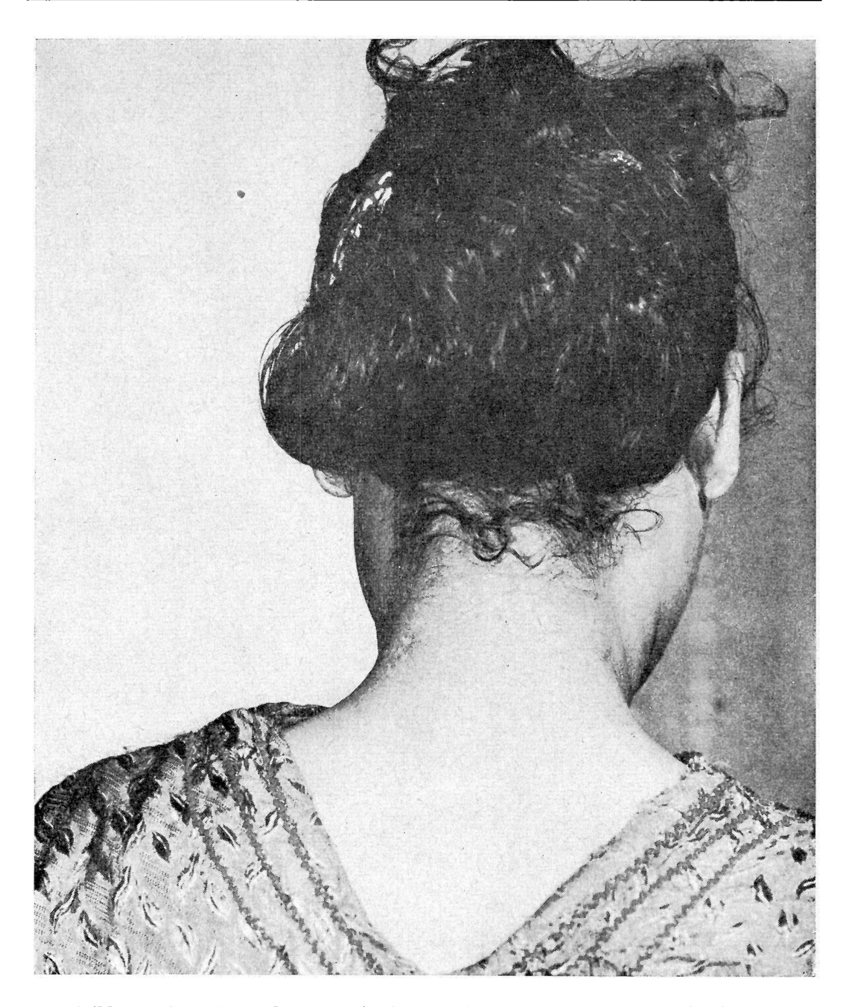


Bild 11.100a Betaverbrennung im Nacken 1 Jahr nach der Strahleneinwirkung

11.97 Die ersten Anzeichen von Hautschäden bestanden aus einer verstärkten Pigmentierung in Form dunkler Flecken und geschwollener Hautstellen (Flecken, Bläschen und Knötchen). Diese Hautschäden entwickelten sich an den nicht durch die Kleidung geschützten Körperpartien, die den Strahlen ausgesetzt waren. Sie traten gewöhnlich in folgender Reihenfolge auf: auf der Kopfhaut (mit Haarausfall), im Nacken, auf den Schultern, an den Vertiefungen am Unterarm, an den Füßen, an den Beinen und am Rumpf. Am häufigsten wurden Haarausfall und Schäden auf der Kopfhaut, im Nacken und an den Füßen beobachtet (Bild 11.97a–b).

11.98 Außerdem trat bei den Bewohnern der Marshall-Inseln und auch bei amerikanischen Negern sehr häufig eine bräunlich-braune Färbung der Fingernägel

auf. Dieses Phänomen scheint eine Strahlenreaktion dunkelhäutiger Rassen zu sein, weil es bei keinem der weißen Amerikaner, die zur gleichen Zeit der Strahlung ausgesetzt waren; in Erscheinung trat. Diese Färbung der Nägel kam auch bei einer Anzahl von Personen vor, die keinerlei Hautschäden aufwiesen. Hier lag die Ursache wahrscheinlich eher in den Gammastrahlen als in den Betateilchen, da die gleiche Wirkung bei den farbigen Patienten beobachtet wurde, die bei ärztlicher Behandlung geröntgt worden waren.

11.99 Die meisten dieser Hautschäden waren nur oberflächlich und bildeten keine Blasen. Mikroskopische Untersuchungen nach 3–6 Wochen ergaben, daß die Schäden an den äußeren Hautschichten (Epidermis) am auffallendsten und in den tieferen Gewebeschichten viel weniger stark waren. Dies entspricht der kurzen Reichweite der Betateilchen auch bei tierischen Geweben. Nachdem sich ein trockener Schorf gebildet hatte, heilten die Schäden schnell; es blieben Stellen zurück, die in der Mitte farblos waren und deren unregelmäßige Randflächen eine dunklere Färbung aufwiesen. Die normale Hautfärbung breitete sich allmählich im Laufe einiger Wochen von innen nach außen aus.

11.100 Bei den Personen, die schwere Verletzungen erlitten hatten, entwickelten sich gewöhnlich an Füßen oder Nacken tiefergehende Schäden, die von leichtem Brennen, Jucken und Schmerzen begleitet waren. Diese Verletzungen waren feucht, näßten und eiterten. Dann überzogen sie sich mit hartem, trockenem Schorf; aber meist heilten diese Wunden sofort nach einer Behandlung, wie sie auch für andere, nicht durch Strahlung verursachte Hautschäden üblich ist. Die ungewöhnlichen Hautverfärbungen blieben eine Zeitlang bestehen, und in mehreren Fällen verging ungefähr ein Jahr, bevor die normale (dunkle) Hautfarbe wiederhergestellt war (Bild 11.100a und b).

11.101 Das Haar begann ungefähr 9 Wochen nach der Bestrahlung in der alten Farbe (im Gegensatz zur Hautverfärbung) und in der gleichen Struktur wieder zu wachsen und war nach 6 Monaten völlig nachgewachsen. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, waren auch die entfärbten Stellen an den Nägeln bis dahin herausgewachsen.

Die inneren Strahlenquellen

11.102 Wo radioaktiver Niederschlag auftritt, besteht immer die Möglichkeit, daß über die Verdauungswege (durch den Genuß von Nahrungsmitteln und Wasser, die durch Spaltungsprodukte verunreinigt worden sind), über die Lungen (durch Einatmen von Luft, die radioaktive Niederschlagsteilchen enthält) oder durch Wunden oder Hautabschürfungen radioaktive Stoffe in den Körper gelangen. Die biologischen Wirkungen von Kernstrahlen aus innerlich abgelagerten Strahlenquellen sind die gleichen wie bei äußeren Strahlenquellen. Es ist jedoch zu beachten, daß selbst eine sehr kleine Menge radioaktiver Stoffe im Körper schwere Schäden verursachen kann.

11.103 Erstens handelt es sich meist bei der Bestrahlung verschiedener Organe und Gewebe aus inneren Strahlenquellen um eine chronische Strahlung, die nur der

Erschöpfung der Menge aktiven Materials im Körper auf Grund physikalischer und biologischer Vorgänge (radioaktiver Zerfall bzw. Ausscheidung) unterworfen ist. Außerdem sind die Gewebe des Körpers, die geschädigt werden können, nicht weit von der Strahlenquelle entfernt und nicht durch dazwischenliegende Stoffe abgeschirmt. Das ist in bezug auf Alpha- und Betateilchen, die außerhalb des Körpers ihren Ursprung haben, von besonderer Bedeutung, denn diese können empfindliche Stellen des Körpers – abgesehen von den äußeren Hautschichten – nicht erreichen. Aber wenn die Strahlenquellen, z. B. Plutonium (Alphateilchenstrahler) oder Spaltungsprodukte (Betateilchenstrahler) sich im Innern des Körpers befinden, dann können die Teilchen ihre ganze Energie an einer kleinen, möglicher-

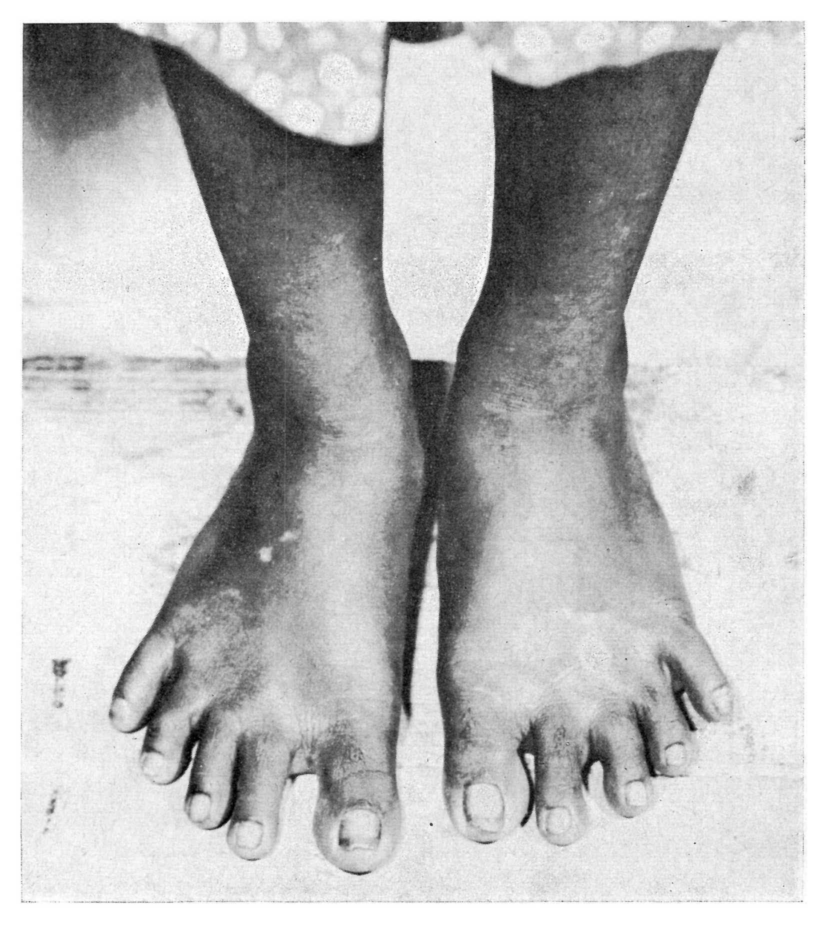


Bild 11.100b Betaverbrennung an den Füßen 6 Monate nach der Strahleneinwirkung

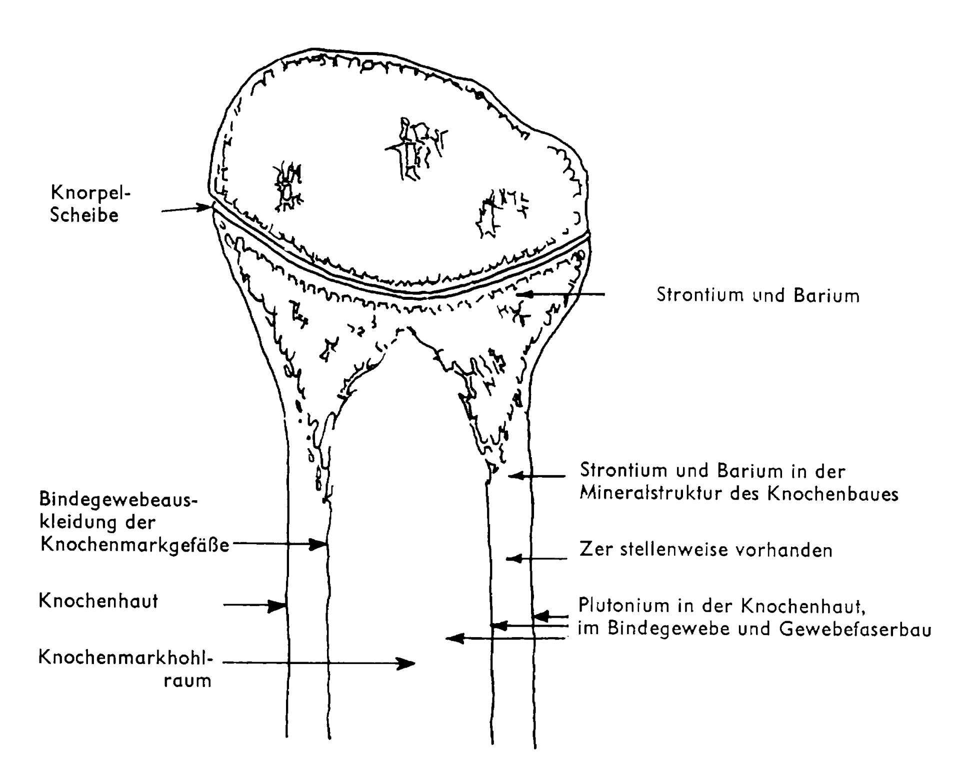


Bild 11.105 Ablagerung von Elementen in den Knochen von Nagetieren

weise empfindichen Stelle des Körpergewebes ausstrahlen und damit große Schäden verursachen.

11.104 Die vorstehend beschriebenen Umstände werden manchmal noch durch die Tatsache erschwert, daß gewisse chemische Elemente dazu neigen, sich auf bestimmte Zellen oder Gewebe zu konzentrieren, von denen manche sehr empfindlich gegen Kernstrahlen sind. Was mit einem Radioisotop geschieht, das in den Blutstrom geraten ist, hängt von seiner chemischen Beschaffenheit ab. Die Radioisotope eines Elements, das ein gewöhnlicher Bestandteil des Körpers ist, machen den gleichen Stoffwechselprozeß durch, wie die natürlich vorkommenden inaktiven (stabilen) Isotope des gleichen Elements. Das ist z. B. bei Jod der Fall, das sich in der Schilddrüse konzentriert.

11.105 Ein Element, das – vielleicht von geringen Spuren abgesehen – für gewöhnlich nicht im Körper vorkommt, wird sich wie ein normalerweise im Körper vorhandenes Element mit gleichen chemischen Eigenschaften verhalten. So lagern sich von den Spaltungsprodukten Strontium und Barium, die chemisch sehr dem Kalzium ähnlich sind, weitgehend in dem kalkhaltigen Knochengewebe ab. Die Radio-

isotope der seltenen Erdelemente, z. B. Zer, das einen großen Prozentsatz der Spaltungsprodukte darstellt, und Plutonium, das in gewissem Umfange im radioaktiven Niederschlag vorhanden sein kann, sind ebenfalls »Knochensucher«. Weil sie aber chemisch nicht dem Kalzium ähnlich sind, lagern sie sich in geringerem Umfange und in anderen Knochenteilen ab als Strontium und Barium (Bild 11.105). Trotzdem sind alle »Knochensucher« möglicherweise sehr große Gefahren, weil sie das empfindliche Knochenmark schädigen können. Die Schädigung des blutbildenden Gewebes führt zu einer Reduzierung der Blutkörperchenzahl und damit zu einer Beeinträchtigung des ganzen Körpers.

11.106 Die aktiven Stoffe müssen, um eine innere Strahlenquelle zu bilden, in den Blutkreislauf gelangen können; von dort aus lagern sie sich in den Knochen, der Leber usw. ab. Solange sich die radioaktiven Substanzen in der Lunge, im Magen und im Darm befinden, sind sie praktisch gesehen eher äußere als innere Strahlenquellen. Wieweit radioaktiver Niederschlag in den Blutstrom gelangen kann, hängt von zwei Hauptfaktoren ab, und zwar von der Größe der Teilchen und von ihrer Löslichkeit in den Körperflüssigkeiten. Ob das Material sich später in einem bestimmten Gewebe ablagert, hängt, wie oben bereits erwähnt, von den chemischen Eigenschaften der betreffenden Elemente ab. Elemente, die nicht dazu neigen, sich in bestimmten Körperteilen zu konzentrieren, werden durch die natürlichen Stoffwechselprozesse ziemlich schnell ausgeschieden.

11.107 Bei gleicher Teilchengröße und Löslichkeit gelangen durch die Atemwege mehr aktive Stoffe in das Blut als durch die Verdauungswege. Das ist wahrscheinlich auf die unterschiedliche Art und Weise zurückzuführen, wie die aktiven Stoffe durch die Lungen und die Verdauungswege hindurchgeleitet werden. Die Menge der durch Einatmen aus dem radioaktiven Niederschlag absorbierten Stoffe scheint aber verhältnismäßig gering zu sein.

11.108 Die Erklärung für diese Tatsache liegt darin, daß die Nase fast alle Teilchen von mehr als 10 Mikron (0,001 cm) Durchmesser und etwa 95% der Teilchen von mehr als 5 Mikron (0,0005 cm) Durchmesser ausfiltern kann. Der größte Teil der während der kritischen Zeit höchster Aktivität, d. h. innerhalb von 24 Stunden nach der Explosion herunterfallenden Teilchen ist von wesentlich größerem Durchmesser als 10 Mikron (Abschn. 9.125ff). Folglich kann nur ein sehr kleiner Teil der in der Luft vorhandenen Niederschlagsteilchen in die Lungen gelangen. Überdies können nur Teilchen von weniger als 5 Mikron aus dem Gewebe der Lunge in den Blutstrom gelangen. Deshalb ist die Wahrscheinlichkeit des Eindringens von Spaltungsprodukten und anderen im radioaktiven Niederschlag vorhandenen Sprengkörperrückständen durch Einatmen nur gering.

11.109 Das Ausmaß der Aufnahme von Spaltungsprodukten und anderen radioaktiven Stoffe aus dem Darm hängt weitgehend von der Löslichkeit der Teilchen ab. Spaltungsprodukte sind ebenso wie Uran und Plutonium im radioaktiven Niederschlag hauptsächlich als Oxyde vorhanden, von denen sich viele in den Körperflüssigkeiten nicht in nennenswertem Maße lösen. Die Oxyde Strontium und Barium hingegen sind löslich, so daß diese Elemente leicht in den Blutstrom und von da in

die Knochen gelangen können. Das Element Jod ist ebenfalls hauptsächlich in löslicher Form vorhanden; es geht schnell ins Blut über und konzentriert sich in der Schilddrüse.

11.110. Außer der Tatsache, daß ein Element leicht von einem strahlenempfindlichen Organ aufgenommen werden kann, muß bei der Feststellung der Gefährlichkeit eines bestimmten radioaktiven Isotops im Körper vor allem die biologische Gesamtdosis berücksichtigt werden, die einwirkt, solange das Isotop sich im Körper (oder in einem empfindlichen Organ) befindet. Die wichtigsten Faktoren zur Ermittlung dieser Dosis sind die Masse und die Halbwertszeit (Abschn. 1.49) des radioaktiven Isotops, die Art und Energie der einwirkenden Strahlen und die Dauer des Verbleibens des Isotops im Körper. Diese Zeitdauer hängt von zwei Faktoren ab: von der gewöhnlichen radioaktiven Halbwertszeit und von der sog. »biologischen Halbwertszeit«. Letztere ist die Zeit, die die Menge eines bestimmten Elements im Körper braucht, um durch natürliche (biologische) Ausscheidungsprozesse auf die Hälfte ihres Anfangswertes verringert zu werden. Die radioaktive und die biologische Halbwertszeit zusammen ergeben die »effektive Halbwertszeit«, d. i. die Zeit, die die Menge eines bestimmten radioaktiven Isotops im Körper braucht, um durch radioaktiven Zerfall und durch natürliche Ausscheidungsprozesse auf die Hälfte ihres Anfangswertes verringert zu werden. In den meisten Fällen ist die »effektive Halbwertszeit« im ganzen Körper im wesentlichen die gleiche wie in dem Gewebe (oder Organ), in dem sich das Element konzentrieren kann.

11.111 Die Isotope, die die größte innere Gefahr darstellen, sind diejenigen mit kurzer radioaktiver und verhältnismäßig langer biologischer Halbwertszeit. Eine bestimmte Menge eines Isotops mit kurzer radioaktiver Halbwertszeit setzt in größerem Umfange Teilchen frei als die gleiche Menge eines anderen Isotops, möglicherweise sogar des gleichen Elements, das eine längere Halbwertszeit hat. Überdies bedeutet die lange biologische Halbwertszeit, daß der aktive Stoff nicht sofort durch natürliche Prozesse aus dem Körper ausgeschieden wird. Das Element Jod hat z. B. eine biologische Halbwertszeit von ungefähr 180 Tagen, weil die Schilddrüse es rasch aufnimmt und nur langsam wieder ausscheidet. Das radioaktive Isotop Jod-131, ein ziemlich bekanntes Spaltungsprodukt, hat eine radioaktive Halbwertszeit von nur 8 Tagen. Wenn also eine genügende Menge dieses Isotops in den Blutkreislauf gerät, können schwere Schäden an der Schilddrüse entstehen. Zu erwähnen ist, daß neben den unmittelbaren Schäden alle in den Körper gelangenden radioaktiven Stoffe, selbst solche mit kürzerer effektiver Halbwertszeit, zu Schädigungen beitragen können, die erst nach einiger Zeit in Erscheinung treten.

11.112 Außer dem radioaktiven Jod gliedern sich die gefährlichsten Spaltungsprodukte – vorausgesetzt, daß sie in ausreichender Menge in den Körper gelangen – in zwei Gruppen. Zur ersten und bedeutungsvolleren Gruppe gehören Strontium-89, Strontium-90 und Barium-140, während die zweite Gruppe aus seltenen Erden und verwandten Elementen, besonders Zer-144 und dem chemisch ähnlichen Yttrium-91 besteht. Wie bereits gesagt, lagern sich diese Elemente im Körper leicht ab und werden in den verschiedenen Knochenpartien festgehalten, wo dann die freigesetzten

Beta- und Gammastrahlen blutbildende Gewebe schädigen und außerdem Tumorbildungen verursachen können.

11.113 Ein anderes gefährliches Element, das in gewissem Umfang im radioaktiven Niederschlag vorhanden sein kann, ist Plutonium in der Form des Alphateilchen ausstrahlenden Isotops Plutonium-239, das der Spaltung entgangen ist. Plutonium-239 hat eine lange radioaktive Halbwertszeit (24000 Jahre) und auch eine lange biologische Halbwertszeit (über 100 Jahre). Wenn es sich also einmal im Körper abgelagert hat, und zwar hauptsächlich an bestimmten Stellen des Knochengewebes (Bild 11.105), dann nehmen die Mengen des vorhandenen Plutoniums sowie seine Aktivität nur sehr langsam ab. Trotz ihrer geringen Reichweite im Körper kann die fortgesetzte Einwirkung der Alphateilchen über eine Reihe von Jahren zu schweren Schäden führen. Es ist bekannt, daß Radium, welches in dieser Hinsicht dem Plutonium ähnlich ist, bei ausreichender Menge Knochenzerfall (Nekrose), Knochentumoren und Anämie verursachen und dann zum Tode führen kann.

11.114 Es ist festgestellt worden, daß Strontium, Barium und Plutonium sich nicht nur im Knochengewebe konzentrieren, sondern sich auch in gewissem Umfange in der Leber und der Milz anreichern. Die seltenen Erden lagern sich ebenfalls in der Leber und in geringem Umfange in der Milz ab. Viele radioaktive Isotope werden jedoch sofort von der Leber ausgeschieden. Es ist interessant, daß trotz großer Mengen radioaktiven Materials, die beim Ausscheidungsprozeß über die Nieren gehen, die letzteren für gewöhnlich nicht weiter geschädigt werden. Dagegen verursacht Uran Nierenschäden, aber mehr als ein chemisches Gift als auf Grund seiner Radioaktivität.

Die Erfahrungen mit dem radioaktiven Niederschlag als einer inneren Gefahr

11.115 Der radioaktive Niederschlag war bei den Kernexplosionen über Japan so geringfügig, daß über die Spaltungsprodukte und sonstigen Sprengkörperrückstände als innere Strahlungsquelle keine Angaben zu erhalten waren. Aber aus den Vorkommnissen auf den Marshall-Inseln im März 1954 wurden sehr interessante Erkenntnisse gewonnen. Ungefähr zwei Tage lang aßen viele Inselbewohner radioaktiv kontaminierte Lebensmittel und tranken ebensolches Wasser aus offenen Behältern, weil sie sich der Bedeutung des radioaktiven Niederschlages nicht bewußt waren.

11.116 Die Ablagerung von Spaltungsprodukten im Körper erfolgte hauptsächlich auf dem Wege über den Magendarmkanal und weniger über die Atmungsorgane, weil neben den oben aufgeführten Gründen die radioaktiven Teilchen in der Luft ziemlich rasch ausgeschieden wurden, aber verstrahlte Lebensmittel, Wasser und Gebrauchsgegenstände die ganze Zeit hindurch verwendet wurden. Die Annahme, daß der Weg über den Magendarmkanal die Hauptquelle für die innere Verstrahlung war, wurde durch die Beobachtungen bestärkt, die bald nach der Explosion an Hühnern und Schweinen gemacht wurden. Es wurde festgestellt, daß der Magendarmkanal und sein Inhalt sowie die Leber radioaktiver waren als das Lungengewebe.

11.117 Durch radiochemische Untersuchungen des Urins der dem radioaktiven Niederschlag ausgesetzt gewesenen Bewohner der Marshall-Inseln war es möglich, die Körperschädigung durch verschiedene Isotope, d. h. ihre in den Geweben abgelagerten Mengen, zu errechnen. Es erwies sich, daß Jod-131 anfangs am meisten zur Radioaktivität beitrug, aber auf Grund seiner relativ kurzen Halbwertszeit (8 Tage) bald verschwand. Etwa das gleiche war bei Barium-140 (Halbwertszeit 12,8 Tage) der Fall; hingegen war die Radioaktivität der Strontium-Isotope von längerer Dauer. Diese haben nicht nur längere radioaktive Halbwertszeiten, sondern auch die biologische Halbwertszeit des Elements ist verhältnismäßig lang.

11.118 Es wurde festgestellt, daß außer Jod, Strontium, Barium und der Gruppe seltener Erden keine Elemente in nennenswerter Menge im Körper zurückgehalten werden. Die Radioaktivität fast aller anderen Spaltungsprodukte und Sprengkörperrückstände verschwindet rasch, entweder wegen der kurzen effektiven Halbwertszeit der Radioisotope, wegen der geringen Löslichkeit der Oxyde oder wegen der besonderen Größe der radioaktiven Niederschlagsteilchen.

11.119 Die Körperschädigung durch radioaktives Material war bei den stärker verstrahlten Bewohnern der Marshall-Inseln nie sehr groß, und sie ließ im Verlauf von 2 oder 3 Monaten ziemlich schnell nach. Die Aktivität der Strontiumisotope nahm wegen der längeren radioaktiven (und biologischen) Halbwertszeit und dem längeren Verbleiben in den Knochen etwas langsamer ab als bei anderen Radio-Isotopen. Trotzdem konnte selbst das Strontium in den untersuchten Fällen nicht als gefährliche innere Strahlenquelle angesehen werden. 6 Monate nach der Explosion enthielt der Urin meist nur noch kaum feststellbare Mengen radioaktiven Materials; daraus ging hervor, daß die Körperschädigung außerordentlich gering war.

11.120 Obwohl die Bewohner der Marshall-Inseln unter Bedingungen lebten, die die sehr große Wahrscheinlichkeit einer Verstrahlung von Lebensmitteln und Wasser mit sich brachten, und obwohl sie nichts unternommen hatten, um sich auf irgendeine Weise zu schützen, war die Gefahr einer inneren Verstrahlung durch radioaktiven Niederschlag nur gering. Es ist deshalb zumindest in bezug auf die kurzzeitige Wirkung wohl kaum zu bezweifeln, daß die Strahlenschäden durch radioaktiven Niederschlag aus inneren Quellen im Vergleich zu den Schäden aus äußeren Quellen ganz geringfügig sind. Wenn zweckmäßige Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden – s. Kap. XII –, kann die Gefahr der kurzzeitigen inneren Strahlung wahrscheinlich weitgehend verringert werden.

Die langanhaltende innere Gefahr

11.121 Neben den möglichen langanhaltenden Wirkungen radioaktiver Stoffe, die eingeatmet oder über den Magendarmkanal aufgenommen und später wieder ausgeschieden werden – ein Vorgang, über den bis jetzt noch wenig bekannt ist – sind Überlegungen in bezug auf das Strontium-90 angestellt worden, das eine verhältnismäßig lange Halbwertszeit hat (s. Kap. X). Die Spaltungsprodukte, besonders die-

jenigen, die sich im Bereich des mehr oder weniger unmittelbaren radioaktiven Niederschlags ablagern, werden in dem Strontiumisotop etwas erschöpft, vielleicht weil einer der Vorgänger des Strontiums in der Zerfallsreihe, nämlich Krypton-90, ein Gas ist. Nach den Erfahrungen mit den Bewohnern der Marshall-Inseln zu urteilen, ist die Wahrscheinlichkeit nur gering, daß Strontium vom Körper aufgenommen und festgehalten wird, wenn örtliche Niederschlagsteilchen über die Atemwege oder über den Magendarmkanal in den Körper gelangen. Dagegen besteht die Möglichkeit, daß Strontium-90 im Laufe der Zeit in gewissen Nahrungsmitteln absorbiert wird.

11.122 Wie in Kap. X dargelegt, setzen sich Strontium-90 und andere Spaltungsprodukte, die als sehr kleine Teilchen in die Stratosphäre gelangt sind, schließlich am Erdboden ab. Das Strontium kann dann vor allem durch Milch und Milchprodukte den Weg in den menschlichen Körper finden. Da Strontium-90, das eine radioaktive Halbwertszeit von etwa 28 Tagen hat, durch natürliche Prozesse nur langsam ausgeschieden wird, sammelt es sich im Knochenbau an. Wenn sich genügende Mengen angehäuft haben, können die langanhaltenden Schäden ähnlich sein wie die durch übermäßige Mengen Radium und Plutonium verursachten (s. Abschn. 11.113).

Die genetischen Wirkungen der Strahlung

Spontan auftretende und induzierte Mutationen

11.123 Bei den genetischen Strahlenwirkungen handelt es sich um Wirkungen langanhaltender Art, die bei den bestrahlten Personen zwar keine sichtbaren Schäden verursachen, aber in späteren Generationen bemerkenswerte Folgen haben können. Diese Wirkungen unterscheiden sich von den meisten anderen, durch Kernstrahlung hervorgerufenen Veränderungen dadurch, daß sie kumulativ und von der Dosisleistung weitgehend unabhängig zu sein scheinen. Mit anderen Worten: das Ausmaß der genetischen Wirkungen hängt von der gesamten empfangenen Strahlendosis und nicht davon ab, ob die Bestrahlung nur von kurzer Dauer war oder sich über viele Jahre hinzog. Ob die Strahlendosis sich über einen langen Zeitraum erstreckt oder akut einwirkt, ist also für die genetischen Veränderungen ohne Bedeutung.

11.124 Mit der Vererbung, die bei allen sich auf geschlechtlichem Wege fortpflanzenden Tieren und Pflanzen einschließlich der Menschen im Grunde in ähnlicher Weise vor sich geht, verhält es sich etwa wie folgt: die Kerne aller sich teilenden Zellen enthalten eine bestimmte Anzahl fadenartiger, unter dem Mikroskop sichtbarer Systeme, die sog. Chromosomen. Es wird angenommen, daß diese Chromosomen entsprechend ihrer Länge sich in Tausende von verschiedenen Einheiten, die sog. Erbanlagen oder Gene, aufgliedern. Die Chromosomen (und Erbanlagen) sind in jeder Zelle des Körpers vorhanden, aber für die Genetik (oder Vererbung) sind nur diejenigen wichtig, die sich in den Keimzellen der Fortpflanzungsorgane befinden.

11.125 Die Zellen des menschlichen Körpers enthalten normalerweise 48 Chromosomen, die sich aus zwei ähnlichen (aber nicht identischen) Reihen zu je 24 zusammensetzen[1]). Eine dieser Reihen ist von der Mutter ererbt, denn die Eizelle (die in den Eierstöcken vorhanden ist) enthält 24 Chromosomen, während die andere Reihe vom Vater stammt, denn die Samenzellen (die in den Hoden gebildet werden) enthalten 24 ähnliche (aber nicht identische) Chromosomen. Wenn aus der Vereinigung einer Eizelle mit einer Samenzelle ein Mensch entsteht, dann verdoppeln sich die Chromosomen und Erbanlagen im allgemeinen ohne Veränderung.

11.126 In seltenen Fällen jedoch kommen Abweichungen vom normalen Vorgang vor, und statt eines sich in jeder Hinsicht verdoppelnden Chromosoms erfolgt eine Veränderung bei einer oder mehreren Erbanlagen. Diese Veränderung, die »Mutation« genannt wird, ist im wesentlichen von bleibender Dauer, denn die abweichende Erbanlage pflanzt sich in ihrer veränderten Form fort. Erfolgt die Mutation in einer Körperzelle, so kann sich dies auf den Träger dieser Mutation auswirken, aber die Veränderung ist nicht erblich. Erfolgt jedoch die Mutation in einer Keimzelle eines Elternteils, so wird diese in einer späteren Generation als eine neue Erbanlage erkennbar. Mutationen, die auf natürliche Weise, d. h. ohne bestimmte Ursache oder menschlichen Einfluß entstehen, werden »spontan auftretende Mutationen« genannt.

11.127 Besonders interessant ist hierbei, daß die Häufigkeit der auftretenden Mutationen auf verschiedene Weise gesteigert werden kann, z. B. durch Bestrahlung der Keimdrüsen (oder »Gonaden«), d. h. der Hoden oder Eierstöcke. Diese Wirkung der Strahlung ist bei verschiedenen Insekten und Säugetieren beobachtet worden, und sie tritt zweifellos auch beim Menschen ein. Die durch Strahlen verursachten Mutationen der Erbanlagen unterscheiden sich in ihrer Art nicht von den spontan auftretenden. Es ist praktisch unmöglich, in einem bestimmten Falle festzustellen, ob die Veränderung auf natürliche Weise entstanden oder auf die Einwirkung von Strahlen zurückzuführen ist. Lediglich die Häufigkeit der auftretenden Mutationen wird durch die Strahlen gesteigert.

11.128 Alle Erbanlagen haben die Eigenschaft, entweder »dominant« der »rezessiv« zu sein. Wenn eine Erbanlage dominant ist, tritt das entsprechende Erbmerkmal, das von dieser Erbanlage beeinflußt wird, in den Nachkommen selbst dann in Erscheinung, wenn nur ein Elternteil Träger der Erbanlage ist. Dagegen muß eine bestimmte rezessive Erbanlage in den Geschlechtszellen beider Elternteile vorhanden sein, wenn das Erbmerkmal in der nächsten Generation in Erscheinung treten soll. Folglich kann eine rezessive Erbanlage für eine Reihe von Generationen latent bleiben, bis sich die Gelegenheit für eine Vereinigung von Samenzellen und Eizellen ergibt, die beide diese Erbanlage enthalten.

11.129 In der Regel sind neue Mutationen, gleichgültig, ob sie spontan auftreten oder durch Strahlung verursacht wurden, rezessiv. Es hat jedoch den Anschein, daß eine mutierte Erbanlage selten völlig rezessiv ist, und es wird daher in der nächsten Generation selbst dann noch eine gewisse Wirkung beobachtet, wenn die betreffende

[1]) Erkenntnisse deuten darauf hin, daß es sich möglicherweise um 46 bzw. 23 Chromosomen handelt.

Erbanlage nur von einem Elternteil stammt. Außerdem haben in einer großen Mehrzahl der Fälle Mutationen schädliche Auswirkungen. Einige der die Mutation begleitenden Veränderungen sind zwar günstig, aber ihre Auswirkungen treten nur im sehr langsamen Prozeß der biologischen Entwicklung in Erscheinung.

11.130 Die nachteiligen Auswirkungen einer schädlichen Mutation können ganz geringfügig sein, z. B. können sie in einer gesteigerten Anfälligkeit für Krankheiten oder einer Kürzung der Lebenserwartung um einige Monate bestehen; sie können aber auch schwerwiegender sein, z. B. den Tod im embryonalen Stadium bedingen oder das Unvermögen bedeuten, überhaupt Kinder zu zeugen. Deshalb sind die Menschen, die schädigende Erbanlagen in sich tragen, im Vergleich zu der übrigen Bevölkerung behindert, besonders im Hinblick darauf, daß sie möglicherweise weniger Kinder haben oder früher sterben werden. Natürlich bleiben derartige Erbanlagen schließlich nicht lange bestehen. Eine sehr schädliche Erbanlage verschwindet bald wieder, weil nur wenige Menschen bis zum zeugungsfähigen Alter am Leben bleiben. Eine mutierte Erbanlage hingegen kann, wenn sie von weniger schwerwiegender Art ist, viel länger bestehen bleiben und damit bei einer großen Anzahl von Menschen zu Schäden führen.

Mutationen und Strahlendosis

11.131 Experimente mit verschiedenen Tierarten haben ergeben, daß die größere Häufigkeit des Auftretens von Mutationen der Erbanlagen infolge Strahleneinwirkung ungefähr proportional zur gesamten Strahlung ist, die von den Keimdrüsen der Eltern vom Beginn ihrer Entwicklung bis zur Zeit der Empfängnis von Kindern absorbiert wurde. Es gibt offenbar keine noch so geringe Strahlenmenge, die die normale Häufigkeit von Mutationen nicht steigert. Die Dosisleistung oder die Dauer der Bestrahlung hat wenig Einfluß; maßgebend ist vielmehr die gesamte in den Keimdrüsen akkumulierte Dosis. Zu bemerken ist jedoch, daß eine große Strahlendosis nicht bedeutet, daß die entstehenden Mutationen gefährlicher sind als bei einer geringen Dosis. Bei einer großen Dosis sind die Mutationen im allgemeinen gleicher Art wie bei einer geringen Dosis oder wie bei den von selbst entstehenden Mutationen; es entstehen aber proportional zur Dosis mehr Mutationen.

11.132 Bei der Betrachtung der möglichen genetischen Wirkungen der Anwendung von Kernwaffen sind zwei Gesichtspunkte von Bedeutung:

1. Die Auswirkungen der Anfangs- und Rückstandsstrahlung gleich nach der Explosion.

2. Die Auswirkungen des sich allmählich ansammelnden Strontium-90 (und vielleicht noch anderer Spaltungsprodukte) im Körper.

Von diesen beiden Faktoren ist der erstere zweifellos der wichtigere. Man hat errechnet, daß außer der natürlichen Umweltstrahlung (s. Abschn. 9.41) je Person der Bevölkerung eine Strahlendosis von 30–80 r an den Keimdrüsen vor der Empfängnis erforderlich wäre, um das Doppelte der Mutationen entstehen zu lassen, die sich bereits auf natürliche Weise von selbst ergeben.

Eine im Verhältnis größere Dosis auf einen kleineren Teil der Bevölkerung würde auf die Häufigkeit der Mutationen und ihre letzten Folgen eine ähnliche Wirkung haben.

11.133 Die genetischen Wirkungen von Strontium-90 dagegen können als sehr gering angenommen werden. Dieses Isotop neigt dazu, sich im Knochengerüst anzusammeln, und da es nur Betateilchen, aber keine Gammastrahlen aussendet, ist die Strahlendosis, der die Keimdrüsen durch in den Knochen abgelagertes Strontium-90 ausgesetzt sind, nur von geringerer Bedeutung. Das gleiche gilt allgemein auch für andere Spaltungsprodukte, die sich im Knochengerüst oder sonstigen Körpergeweben konzentrieren.

Pathologie der Strahlenverletzung[1])

11.134 Die vorstehende Abhandlung befaßte sich hauptsächlich mit den Gesamtsymptomen und -wirkungen der Strahlenschäden; selbst die Blutveränderungen können weitgehend als indirekte Einwirkung von Kernstrahlen auf das Knochenmark und das Lymphgewebe angesehen werden. Es ist deshalb interessant, die in einigen Organen und Geweben durch die Strahlung verursachten Veränderungen einer kurzen Betrachtung zu unterziehen.

11.135 Die durch Strahlung verursachten Schäden haben zweifellos ihren Ursprung in den einzelnen Zellen. Wie in Abschn. 11.45 gesagt, entsteht eine Anzahl feststellbarer Veränderungen in den Zellen und ihrem Inhalt durch Kernstrahlung. Verschiedene Arten von Zellen zeigen in ihrer Reaktion bemerkenswerte Unterschiede. Im allgemeinen sind die sich schnell vermehrenden oder aktiv reproduzierenden Zellen strahlenempfindlicher als ruhende Zellen. Eine der auffallendsten Strahlenwirkungen ist das plötzliche Nachlassen oder sogar völlige Aufhören der Zellteilung (Mitose) in Organen, die sich normalerweise in einem Zustand dauernder Neubildung befinden.

11.136 Die Strahlenempfindlichkeit der Gewebe nimmt in folgender Reihenfolge ab: Lymphgewebe und Knochenmark; Epithelgewebe (Hoden und Eierstöcke, Speicheldrüsen, Haut und Schleimhaut); endotheliale Zellen der Blutgefäße und des Bauchfells, Bindegewebszellen, Knochenzellen, Muskelzellen und verschieden (oder nach besonderer Richtung) sich entwickelnde Nervenzellen. Einige Gehirn- und Nervenzellen, besonders bei Embryonen, sind jedoch ziemlich strahlenempfindlich. Das Verhalten einiger dieser Zellen unter dem Einfluß der Strahlung ist nachstehend beschrieben.

Lymphgewebe

11.137 Lymphgewebe sind die für die Lymphdrüsen, die Mandeln, die Nasenpolypen, die Milz und bestimmte Partien der Darmwände charakteristischen Gewebeelemente. Die in verschiedenen Teilen des Körpers vorhandenen sog. Lymph-

[1]) Die restlichen Abschnitte dieses Kapitels können ohne Verlust an Zusammenhang ausgelassen werden.

drüsen bestehen aus einem Netz von Bindegewebe, in dessen Maschen sich die Lymphzellen befinden. Diese Zellen werden, wenn sie reif sind, von der durch die Drüsen fließenden Lymphflüssigkeit weggetragen und werden zu Lymphozyten, einer Art der weißen Blutkörperchen (Abschn. 11.77). Wie im vorhergehenden Abschnitt festgestellt, ist das Lymphgewebe das strahlenempfindlichste Gewebe.

11.138 Wird dieses Gewebe der Strahlung ausgesetzt, dann werden die Lymphzellen beschädigt oder zerstört. Mikroskopische Untersuchungen zeigen degenerative Veränderungen, die für das Absterben der Zellen charakteristisch sind. Die Degeneration des Lymphgewebes, zu der auch die Bildung abnormer Zellen gehört, zeigte sich vor allem bei den Opfern der Atomsprengkörper in Japan. Durch Schädigung der Lymphzellen wird die Zahl der Lymphozyten im Blutkreislauf verringert. Die Strahlen verletzen aber nicht nur die Lymphozyten tragenden Gewebe, sondern können auch die bereits im Blut vorhandenen Lymphozyten zerstören oder beschädigen. Wenn innerhalb von 72 Stunden nach der Bestrahlung kein merkliches Absinken der Zahl der Lymphozyten festzustellen ist, kann angenommen werden, daß die Dosis zu gering war, um nennenswerte Schäden zu verursachen.

11.139 Das durch Strahlung beschädigte Lymphgewebe wird leicht ödematös, d. h. auf Grund seröser Flüssigkeitsansammlung neigt es dazu, anzuschwellen. Unter den Opfern der Strahlung in Japan war die Zerstörung der Lymphdrüsen sowie der Mandeln und der Lymphgewebe an den Darmwandungen eine häufige Erscheinung.

Das Knochenmark

11.140 Da die meisten Blutzellen, soweit es sich nicht um Lymphozyten handelt, im Knochenmark entstehen, ist die Tatsache, daß dieses Gewebe sehr strahlenempfindlich ist, von großer Bedeutung. Unter normalen Umständen verlassen die reifen Blutzellen das Mark und nehmen ihren Weg in den Blutkreislauf. Dort bleiben sie unterschiedlich lange, bevor sie durch natürliche Prozesse zerstört werden. Je kürzer im allgemeinen die Lebensdauer einer Blutzellenart ist, um so eher werden durch zahlenmäßige Abnahme dieser Zellen Strahlenschäden offenbar. Die roten Blutkörperchen, die die längste Lebensdauer haben, sind die letzten, die nach der Bestrahlung eine zahlenmäßige Abnahme aufweisen (Abschn. 11.80).

11.141 Das Knochenmark zeigt gleich nach der Bestrahlung auffallende Veränderungen. Das die Blutzellen bildende Gewebe hört auf zu funktionieren, und in einigen schweren Fällen in Japan wurde beobachtet, daß das normalerweise Granulozyten produzierende Gewebe plasmazellenähnliche Zellen bildete. Starker Knochenmarkschwund war bei vielen Personen festzustellen, die 3 oder 4 Monate nach der Bestrahlung an Strahlenschäden starben, obgleich Anzeichen dafür vorlagen, daß der Körper versucht hatte, sich von den Schäden wieder zu erholen. In einigen Fällen war eine gelatineartige Ablagerung an die Stelle des normalen Knochenmarks getreten.

Die Fortpflanzungsorgane

11.142 Bei fast allen an Strahlenschäden gestorbenen Männern stellte man bei einer nach ihrem Tode durchgeführten Untersuchung starke Veränderungen an den Hoden fest. Bereits 14 Tage nach der Bestrahlung, als sich die Veränderungen noch nicht bemerkbar machten, zeigte eine mikroskopische Untersuchung Veränderungen in den Epithelschichten, aus denen sich die Samenzellen entwickeln. Viele dieser Zellen waren degeneriert, und es waren keine Anzeichen einer normalen Zellteilung vorhanden.

11.143 Obgleich die Eierstöcke ebenfalls sehr strahlenempfindlich sind, erschienen hier die Veränderungen bei den japanischen Frauen weniger auffallend als bei den Hoden der Männer. Abgesehen von Blutungen, die aber der allgemeinen Neigung zu Blutungen zuzuschreiben waren, entstanden keine größeren bemerkbaren Veränderungen. Bei vielen Überlebenden entwickelten sich die Eizellen nach der Bestrahlung nicht normal; dadurch entstanden Veränderungen im Menstruationszyklus. Es wurde ein – allerdings vorübergehendes – Ausbleiben der Menstruation festgestellt. Fehl- und Frühgeburten kamen häufiger vor. Die Sterblichkeit unter den werdenden Müttern nahm zu. Im allgemeinen traten diese Erscheinungen verschieden stark auf, je nachdem, wie weit die Betreffenden vom Explosionspunkt entfernt gewesen waren.

11.144 Im Zusammenhang mit den Veränderungen der Fortpflanzungsorgane ist zu bemerken, daß die Dosis, die nötig ist, um bei Menschen zur Sterilität zu führen, mit 450 bis 600 Röntgen angenommen wird: diese Dosis ist, wenn der ganze Körper davon betroffen wird, in den meisten Fällen tödlich. Jedoch kann bei geringerer Dosis eine zeitweilige Sterilität auftreten, wie es unter den japanischen Männern und Frauen der Fall war. Die große Mehrzahl der Betroffenen hat seitdem wieder ihren normalen Zustand erreicht, obwohl nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, daß alle völlig wiederhergestellt sind; denn viele, die größeren Strahlendosen ausgesetzt waren, haben seitdem offenbar gesunde Kinder bekommen.

Haarausfall

11.145 Haarausfall, vor allem auf dem Kopf, war bei den Japanern, die länger als zwei Wochen nach der Explosion noch am Leben waren, eine häufige Erscheinung. Meist begann der Haarausfall sowohl bei Männern als auch bei Frauen zwischen dem 13. und dem 14. Tag nach der Strahleneinwirkung. Beim Kämmen oder Zupfen fiel das Haar plötzlich in Büscheln aus. Ein großer Teil fiel ganz von selbst aus; dieser Zustand dauerte 1–2 Wochen und hörte dann wieder auf.

11.146 In den meisten Fällen entwickelte sich der Haarausfall wie bei gewöhnlicher Kahlköpfigkeit; er fing über der Stirn an und griff dann auf den oberen und den hinteren Teil des Kopfes über. Augenbrauen, Wimpern und Bart gingen viel weniger schnell aus. Aus einer kleinen Gruppe von Japanern, die mehr oder weniger typisch

gewesen sein mögen, verloren 69% das Kopfhaar, 12% das Haar aus den Achselhöhlen, 10% das der Schamgegend, 6% die Augenbrauen und 3% den Bart. In schweren Fällen begann das Haar erst innerhalb von ein paar Monaten wieder zu wachsen; in keinem Fall war der Haarausfall von Dauer.

Der Magendarmkanal

11.147 Die Schleimhautwände des Magendarmkanals gehörten zu den Geweben, die bei den bestrahlten Japanern zuerst Veränderungen aufwiesen. Noch bevor Blutungen und ihre Folgeerscheinungen bemerkt wurden, traten ein Anschwellen, eine Verfärbung und eine Verdickung der Schleimhäute des Blinddarms und des Dickdarms auf. Die Lymphgewebe waren besonders betroffen. Bei vielen Patienten kam es zunächst zu einem Anschwellen, dann zur Geschwürbildung in den obersten Schleimhautschichten des Darmkanals; danach bildeten sich Geschwüre auch in den tieferen Schichten, und schließlich entstand ein hautartiger Überzug auf dem Geschwür, etwa ähnlich wie bei der infektiösen Ruhr, wenn auch nicht völlig gleichartig.

11.148 Wie nach dem Tode der Betroffenen festgestellt wurde, bestand meist eine Entzündung des Darmes und gelegentlich auch des Magens. In den Anfangsstadien war auch der Dünndarm befallen, aber später wurde bei den Überlebenden der ganze Dickdarm von dem unteren Ende des Dünndarms bis zum Mastdarm in Mitleidenschaft gezogen. Die Verdickung der Darmwand und die Bildung hautartiger Schichten gehörten zu den üblichen Anzeichen, wie sie auch bei der akuten infektiösen Ruhr auftreten. Die Wirkungen waren offenbar bedingt durch die Zerstörung der Gewebe als Anfangswirkung der Bestrahlung, durch stellenweise geschwächte Widerstandskraft und durch eine Verringerung der Abwehrkräfte, die gewöhnlich durch die Blutzirkulation gewährleistet wird. Unter dem Mikroskop wurden Veränderungen festgestellt, zu denen das Anschwellen der Zellen und das Fehlen der Zufuhr weißer Blutkörperchen gehörten.

Blutungen und Infektion

11.149 Bestimmte Teile der Harnwege, der Muskeln und aller weichen Gewebe des Körpers können innere Blutungen aufweisen, die ihrem Umfang nach von einer Nadelspitze bis zu Stellen mit einem Durchmesser von mehreren Zentimetern reichen. Diese Veränderungen sind bedeutsam, denn sie zeigen dem Arzt die Art und Schwere der Strahlenschäden an. Falls es an wichtigen Körperzentren zu Blutungen kommt, z. B. im Herzen, in der Lunge oder im Gehirn, können die Folgen verhängnisvoll sein. Die Schädigung hängt von der örtlichen Lage der Blutung in bezug auf die Gewebe des betreffenden lebenswichtigen Organs ab. Manche Blutungen machen sich äußerlich bemerkbar oder sind bei Untersuchungen feststellbar, z. B. an der Innenseite des Mundes, der Nase und des Rachens, hinter der Netzhaut oder in den

Harnwegen. Große Blutungen können in den Nierenwegen, in den von der Niere zur Blase führenden Harnleitern und in der Harnblase vorkommen.

11.150 Blutungen, die durch die oberste Epithelschicht dringen und voller Bakterien sind, können noch andere Wirkungen hervorrufen. Die Gewebe werden dadurch geschwächt und haben keine Widerstandskraft mehr gegen Infektionen, so daß die Bakterien, die unter gewöhnlichen Umständen nur wenig wirksam oder selten gefährlich sind, sich hier unbeschränkt vermehren können.

Diese Bakterien können dann zu schweren örtlichen Gewebezerstörungen und unter Umständen zu einer systematischen Infektion führen. Normalerweise harmlose Bakterien, wie man sie gewöhnlich in den Verdauungswegen und auf der Haut findet, können in den Blutkreislauf gelangen und Blutvergiftungen und tödlich verlaufende Infektionen verursachen. Furunkel und Abzesse können sich in ähnlicher Weise in jedem Teil des Körpers bilden, aber bei diesen ist charakteristisch, daß sie örtlich begrenzt bleiben.

11.151 Kommt eine solche Form von Gewebeveränderungen im Rachen vor, dann können die medizinischen Befunde ähnlich sein wie bei bestimmten chemischen Vergiftungen, die das Knochenmark und das netzförmige Endothelsystem verletzen. In anderen Fällen können sie ähnlich sein wie bei bestimmten Blutkrankheiten, bei denen im zirkulierenden Blut die Granulozyten fehlen (Agranulocytose). Bei Strahlenschäden erstrecken sich die Geschwüre unter Umständen auch auf die Zunge, das Zahnfleisch, die Mundhöhle, die Rippen und sogar auf die äußeren Schichten der Gesichtshaut. Diese Geschwürsbildung kann unabhängig von irgendwelchen damit verbundenen örtlichen hämorrhagischen Veränderungen auftreten. Ähnliche Wirkungen sind im ganzen Magendarmkanal beobachtet worden. In der Lunge kann sich eine Form von Lungenentzündung entwickeln, die sich von den meisten Lungenentzündungen durch das nahezu völlige Fehlen einer Infiltration mit weißen Blutkörperchen unterscheidet.

KAPITEL XII

Schutzmaßnahmen

Einleitung

Schutzarten

12.1 In den vorhergehenden Kapiteln dieses Buches sind die zerstörenden Wirkungen von Kernwaffen beschrieben und erörtert worden. Zu diesen Wirkungen gehören Gebäudeschäden und Verletzungen von Personen durch Luftdruckwellen, Erdstoß- und Wasserstoßwellen, thermische Strahlungen sowie Anfangs- und Rückstandsstrahlung. In diesem Kapitel soll nun versucht werden, einige der vielen Punkte, die man bei der Planung von Maßnahmen gegen diese verschiedenen Wirkungen zu erwägen hat, besonders aufzuführen. Das Schutzproblem ist schwierig, weil dabei nicht nur die Wirkungen an sich, sondern außer den Methoden und der Wirksamkeit der Warneinrichtungen auch wirtschaftliche, soziale und psychologische Faktoren zu berücksichtigen sind.

12.2 Die verschiedenen Wirkungen sind in diesem Buch in ziemlich genauen Begriffen dargelegt. Aber bei der Planung des Schutzes stößt man auf so viele Unberechenbarkeiten, daß es unmöglich ist, eine bestimmte Situation genau zu analysieren. Zu diesen auf der Hand liegenden veränderlichen Größen gehören u. a. der Zielpunkt für ein gegebenes Objekt, der Explosionswert der Kernwaffe, die Höhe und Art der Explosion, die Abweichung vom Ziel, die Topographie des Zielgebietes und die Wetterverhältnisse.

12.3 Gegen die Waffenwirkungen gibt es im allgemeinen zwei Arten von Schutz: diese können als »Abstand« und »Deckung« zusammengefaßt werden. Mit anderen Worten: man muß entweder aus der Reichweite der Wirkungen herausgelangen oder innerhalb des Schadensbereiches für einen Schutz sorgen. Der erste Grundsatz, d. h. die Schaffung eines Abstands, ist bestimmend für die Auffassung der Zivilverteidigung, daß die Bevölkerung möglicher Zielgebiete zu evakuieren ist[1]). Bei Diskussionen über die Evakuierung ist das vorliegende Buch nur insofern von Nutzen, als es dazu beiträgt festzustellen, was für die Evakuierten als eine sichere Entfernung gelten könnte. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Wirkung des radioaktiven Niederschlags das Evakuierungsproblem ungeheuer erschwert, weil es eine Gefahr mit sich bringt, die weit über die unmittelbare Schadenszone hinausreicht. Deshalb ist dieses Kapitel nur einigen mit dem Prinzip der Deckung zusammenhängenden Betrachtungen gewidmet, wobei mit »Deckung« Schutzräume oder Schutzbauten gemeint sind.

---

[1]) Das Evakuierungsproblem ist in folgenden Veröffentlichungen der FCDA behandelt: »Procedure for Evacuation Traffic Movement Studies«, TM-27-1; »Evacuation of Civil Populations in Civil Defense Emergencies«, TB-27-1; »Evacuation Check List« TB-27-2.

12.4 Das Problem eines Schutzes durch Schaffung geeigneter Deckung ist an sich schon sehr kompliziert. Es ist jedoch nicht ganz so schwierig, wie man auf Grund der vielen in Abschnitt 12.1 aufgeführten Faktoren annehmen könnte. In vielen Fällen würden geeignete Vorkehrungen gegen Luftdruck, Stoß- und Brandschäden auch die Gefährdung der Menschen durch thermische Strahlung und Kernstrahlung verringern.

12.5 In bezug auf Verbrennungen durch thermische Strahlung sind die wesentlichen Punkte der Schutz der Menschen gegen direkte Bestrahlung und das Vermeiden von leicht brennbarem, überflüssigem Zeug und dunklen Stoffen, insbesondere in der Nähe von Fenstern. Der einzige bekannte Schutz gegen die in Kernstrahlungen enthaltenen Gammastrahlen und Neutronen ist eine ausreichende Masse an Material, das zwischen den Menschen und den Atomsprengkörper, d. h. den aufsteigenden Feuerball und den evtl. nachfolgenden radioaktiven Niederschlag gebracht wird. Die Verwendung von Beton als Baustoff, der zur Verringerung der durch Luftdruck und Erdstoß entstehenden Schäden zweckmäßig ist, verringert auch weitgehend die Gefahr der Kernstrahlung. Eine zusätzliche Erdabdeckung ist in diesem Zusammenhang von Nutzen.

12.6 In bezug auf bauliche Schäden sind die Probleme der Errichtung von Bauwerken, die der Luftdruckwirkung von Kernwaffen standhalten sollen, etwas anders als beim Einsatz herkömmlicher Waffen. Ein TNT-Sprengkörper wird an einem Gebäude gewöhnlich örtlich begrenzte Zerstörungen hervorrufen; aber ein Atomsprengkörper verursacht ein Versagen durch Einsturz oder Umsturz des ganzen Gebäudes. Die verhältnismäßig lange Dauer der Luftdruckwelle aus der starken Energieauslösung einer Kernexplosion ergibt im Vergleich zu einer gewöhnlichen Explosion große Unterschiede in der Art der Wirkungen.

12.7 Ein anderer bedeutsamer Unterschied zwischen den Auswirkungen von Atomsprengkörpern und herkömmlichen Sprengkörpern ist das im ersteren Falle viel größere Schadensgebiet. Selbst Sprengkörper mit 20 kt Explosionswert, wie sie über Japan explodierten, können in einem Gebiet von mehreren Quadratkilometern Zerstörungen verursachen (Bild 12.7). Mit Waffen im Megatonnenbereich kann das Schadensgebiet sich auf hundert oder noch mehr Quadratkilometer erstrecken.

Allgemeine Betrachtungen über Schutzmaßnahmen

12.8 Die wirkungsvollste, aber nicht unbedingt praktischste Methode der Verringerung der Kernwaffengefahr wären Evakuierung der Bevölkerung und Errichtung unterirdischer Bauwerke. Diese Maßnahmen gehen über den Rahmen dieser Abhandlung hinaus, aber es ist eine Anzahl anderer Möglichkeiten zur Verringerung der durch eine Kernexplosion entstehenden Personenverluste und baulichen Schäden aufgeführt. Der Hauptzweck dieser Abhandlung liegt darin, einige der für die Planung von Schutz- und Kontrollmaßnahmen erforderlichen Grundlagen zu schaffen. Die Entwicklung diesbezüglicher Methoden und die Verbreitung von Informationen obliegen der amerikanischen Bundeszivilschutzverwaltung.

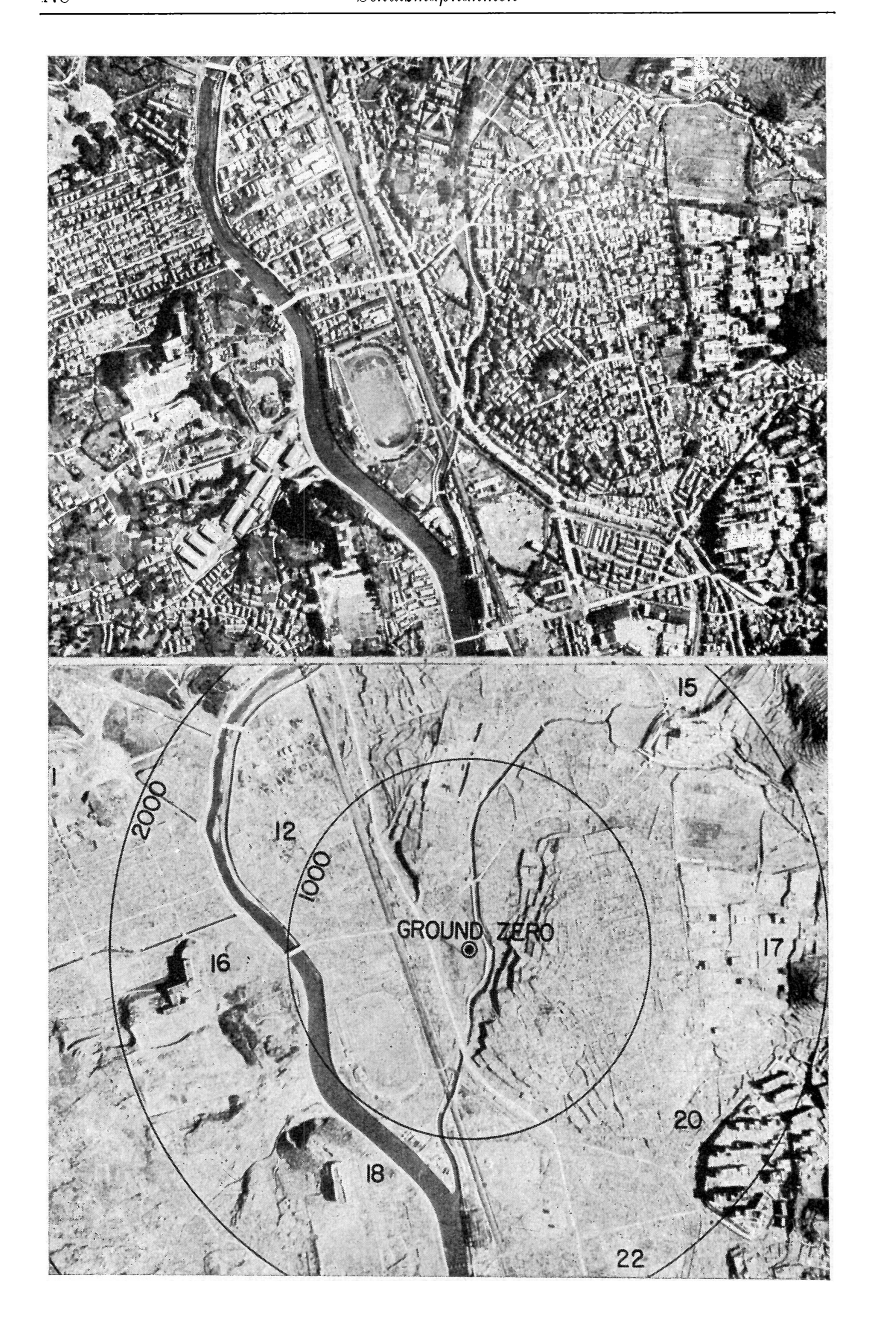


Bild 12.7 Gebiet um den Nullpunkt in Nagasaki vor und nach der Kernexplosion

12.9 Die Konstruktion von Neubauten bietet die beste Gelegenheit, Schutzvorkehrungen bei geringstem Kostenaufwand zu schaffen. Aber in vielen Fällen können auch vorhandene Gebäude so umgebaut werden, daß sie widerstandsfähiger gegen Luftdruck, Feuer und Strahlung werden und damit den Schutz steigern, den sie für Menschen und Inventar bieten. So können z. B. die Luftdruckschäden durch erhöhte Widerstandsfähigkeit eines Bauwerks, insbesondere gegen seitlichen Druck, verringert werden. Die Brandgefahr kann durch Vermeidung ungeschützter entzündlicher Materialien begrenzt werden. Schließlich kann ein gewisser Schutz gegen Gammastrahlen und Neutronen durch ausreichende Baustoffdicke erzielt werden.

12.10 In diesem Kapitel sind weiter unten verschiedene Vorschläge für die Konstruktion von Neubauten und die Verbesserung bereits vorhandener Gebäude gemacht worden. Diese Vorschläge beziehen sich aber vor allem auf mehrstöckige Gebäude für Geschäfts-, Industrie- und Verwaltungszwecke. In bezug auf gewöhnliche Wohnbauten kann ohne übermäßig hohe Kosten nicht viel getan werden, den Oberbau gegen die Luftdruckwirkungen widerstandsfähig zu machen. Die Kellerwände, die Auflager für die Träger und die ganze Konstruktion des Erdgeschosses über dem Keller können aber zu tragbaren Kosten gut verstärkt werden, und es können im Keller Schutzräume eingebaut werden.

12.11 Eine Luftdruckwelle mit einer Überdruckspitze von etwa 0,14 kg/cm² verursacht in den meisten Wohnungen beträchtliche Schäden, und es ist fraglich, ob es möglich ist, ein Haus zu annehmbaren Kosten zu bauen, das einer Überdruckspitze von mehr als 0,35 kg/cm² widerstehen kann. Bauten von industriellem und strategischem Wert können, wenn die Mehrkosten akzeptiert werden, so konstruiert werden, daß sie einem Überdruck von 1,75 kg/cm² oder mehr standhalten.

12.12 Vor weiteren Erörterungen über die Konstruktion solcher Bauwerke muß festgelegt werden, gegen welchen Überdruck und welche Intensität der Anfangsstrahlung das Gebäude Schutz bieten soll. Bei der Wahl der Konstruktionsart muß natürlich ein Risiko eingegangen werden, da die bei einem Kernwaffenangriff tatsächlich festgestellten Gegebenheiten je nach Größe des Atomsprengkörpers und Entfernung des Bauwerks von der Explosion gefährlicher oder ungefährlicher sein können, als bei der Konstruktion angenommen wurde. Es bestünde auch die Möglichkeit, das Bauwerk außergewöhnlich widerstandsfähig zu machen, so daß es einem hohen Überdruck von etwa 7 kg/cm² standhalten kann. Eine solche Möglichkeit ist allerdings mit außergewöhnlichen Anforderungen verbunden; z. B. müßte unterirdisch gebaut werden. Aber dies würde unbedingte Abhängigkeit von künstlicher Beleuchtung und eine Klimaanlage bedeuten und die Schaffung einer eigenen Stromversorgung und sonstiger katastrophensicherer Anlagen und Versorgungseinrichtungen erfordern (s. Abschn. 12.52).

12.13 Bei der Mehrzahl der Bauwerke muß die Konstruktion einen Kompromiß zwischen der Widerstandsfähigkeit gegen verschiedene Kernwaffenwirkungen, der strategischen Bedeutung des Gebäudes sowie der Schwierigkeit und den Kosten der Ausführung darstellen. Bei der Entscheidung über die sog. »praktischen Konstruktionsbedingungen« kann Bild 12.13 herangezogen werden. Hier sind die Grenzent-

fernungen vom Nullpunkt für Luftexplosionen verschiedenen Explosionswertes für bestimmte Wirkungen der Anfangsstrahlung (Gammastrahlen und Neutronen), der thermischen Strahlung und der Druckwelle angegeben. Es ist festzustellen, daß nur die widerstandsfähigsten Stahlbetonbauten einem Überdruck von 1,68 kg/cm² standhalten können; die meisten Wohnhäuser werden bei 0,35 kg/cm² zerstört oder schwer beschädigt. Die auf den Kurven in Bild 12.13 angegebenen Drücke stellen die Werte der horizontalen Komponenten für typische Luftexplosionen dar. Eine Kernstrahlungsdosis von 700 rem ist wahrscheinlich für fast alle ungeschützten Personen tödlich.

Luftdrucksichere Bauwerke

Allgemeine Konstruktionsmethoden

12.14 Die Konstruktion luftdrucksicherer Bauwerke erfordert die Berücksichtigung der dynamischen Belastung des betreffenden Bauwerks. Wie in den vorigen Kapiteln dargelegt, erfolgt die zu berücksichtigende dynamische Belastung plötzlich und ist je nach ihrer Zeitdauer unterschiedlich. Diese unterschiedliche Zeitdauer hängt von den Merkmalen der Druckwelle selbst sowie von der Form, den Abmessungen und der Widerstandsfähigkeit der verschiedenen Teile des Bauwerks ab. Die Ermittlung der Reaktion eines Bauwerks auf dynamische Belastung erfordert ein ganz anderes Verfahren als die herkömmliche Untersuchung über die Reaktion eines Bauwerks auf statische Belastung (s. Kap. VI).

12.15 Im allgemeinen unterscheidet sich die luftdrucksichere Konstruktion in drei Punkten von den Konstruktionsmerkmalen für statische Belastungen. Erstens ist die Masse wichtig, denn wenn sich bauliche Verschiebungen ergeben, werden die verschiedenen Massen stark beschleunigt. Bei sonst gleichen Voraussetzungen widersteht ein massives Bauwerk der Luftdruckwirkung gewöhnlich besser als ein weniger massives Bauwerk. Zweitens entwickeln viele Baustoffe einschließlich Stahl, Beton und sogar Holz eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen schnelle Beanspruchungen, wie es z. B. der Fall wäre, wenn sie einer Druckwelle ausgesetzt würden. Bei hoher Belastungsgeschwindigkeit kann der Fließpunkt den Wert für geringe Belastungsgeschwindigkeiten um 50% oder mehr übersteigen. Drittens: wenn bei luftdrucksicheren Konstruktionen elastische Baustoffe verwendet werden, ist es möglich und aus wirtschaftlichen Gründen vielleicht sogar zweckmäßig, Beanspruchungen über die Elastizitätsgrenze hinaus zuzulassen.

12.16 Ein gewisser Grad bleibender Verformung kann annehmbar sein, bevor ein Gebäude für seinen Hauptzweck als wertlos angesehen werden muß; dies kann beim Entwurf berücksichtigt werden. Ein Gebäude von der Art eines Stahlwerks ist ein gutes Beispiel für ein Bauwerk, bei dem eine starke bleibende Verformung hingenommen werden kann. Dagegen werden Bürogebäude, Wohnhäuser usw., die

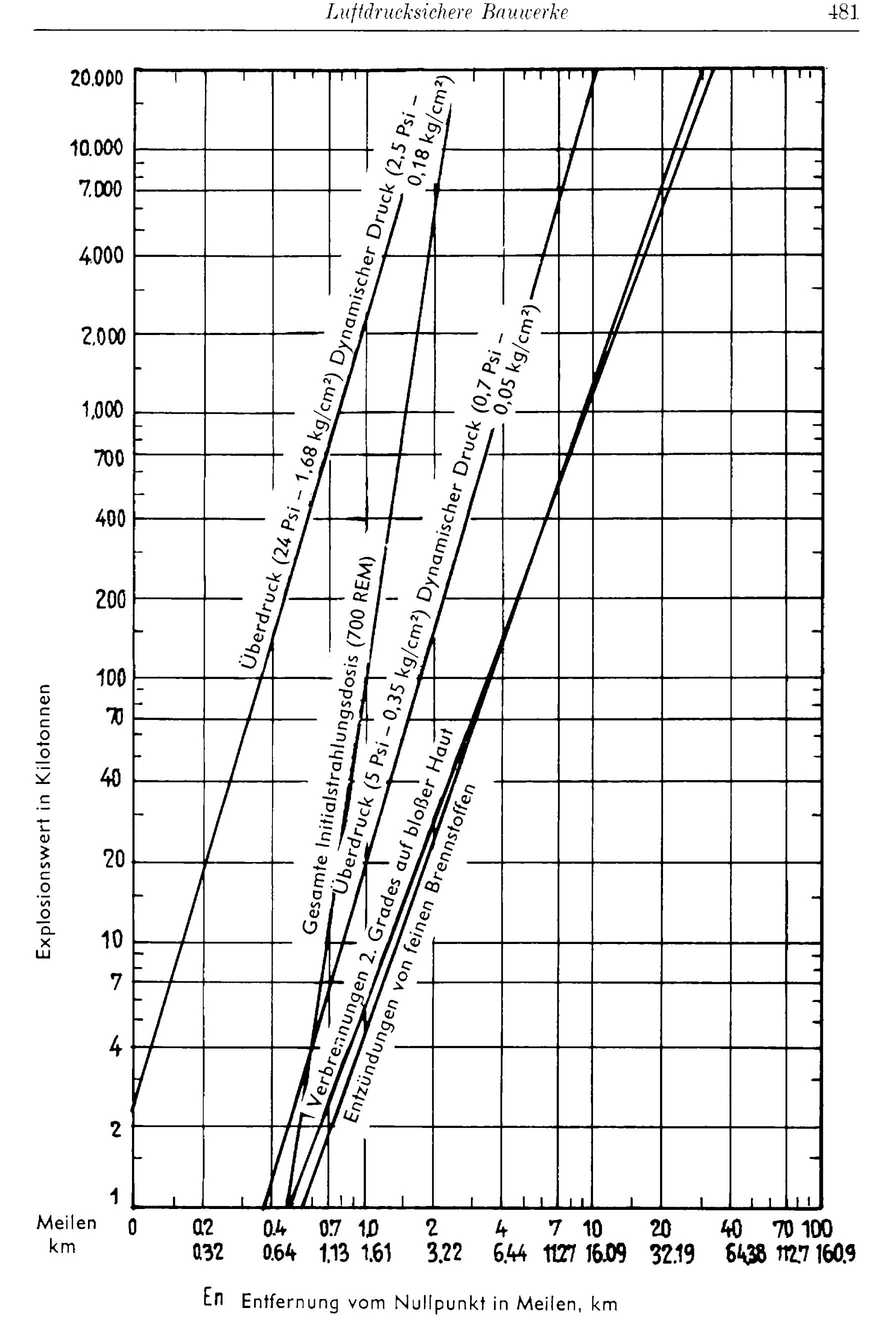


Bild 12.13 *Grenzentfernungen vom Nullpunkt, in denen bei einer Luftexplosion verschiedene Wirkungen erzeugt werden*

Fahrstuhlschächte, Trennwände, Türen, Fenster und verdeckte Leitungsführungen haben, durch viel geringere Verformungen in ihrer Verwendbarkeit beeinträchtigt.

12.17 Bei der luftdrucksicheren Konstruktion einer bestimmten Gebäudeart müssen zunächst die Merkmale der Druckwelle, d. h. die Überdruckspitze und der dynamische Druck und deren Veränderungen im Verlauf der Zeit angesetzt werden. Diese Faktoren hängen vom Explosionswert, von der voraussichtlichen Entfernung des Bauwerks vom Explosionspunkt und von der Explosionshöhe ab. Da keine dieser Variablen im voraus bekannt sein kann, sind die Annahmen bezüglich der Luftdruckbelastung, der das Gebäude standhalten soll, stets ziemlich ungenau. Bei der angenommenen Luftdruckbelastung muß für die Zwecke des Entwurfs ein Gleichgewicht zwischen Kosten und Gesamtbedeutung des betreffenden Bauwerks zugrunde gelegt werden.

12.18 Nachdem die Belastung festgesetzt ist, muß eine dynamische Analyse des beabsichtigten Bauwerks durchgeführt werden, um die Biegefestigkeit und die Bruchfestigkeit zu ermitteln, die notwendig sind, um einen Einsturz zu verhüten oder die plastische Verformung auf einen bestimmten Grad zu begrenzen. Diese Grenze wird durch die funktionellen Erfordernisse der Tätigkeit oder der Arbeiten, für die das Bauwerk gedacht ist, bestimmt. Die kritische Verformung kann so weit beschränkt werden, daß ein Einsturz des Bauwerks verhütet wird, so daß die Menschen geschützt und das Inventar des Gebäudes gerettet wird. Es kann aber auch gefordert werden, daß das Gebäude nach der Druckwelle für normale Belastungen noch benutzbar ist. Dann muß als nächstes bei der Konstruktion eine genaue Beschreibung der Bauteile und Verbindungen ausgearbeitet werden, um die erforderliche Widerstandsfähigkeit und Biegefestigkeit zu gewährleisten.

12.19 Die ins einzelne gehenden Methoden und Verfahren der dynamischen Konstruktion sind wahrscheinlich nötig, um das Verhalten eines Bauwerks, das der Belastung einer Druckwelle ausgesetzt ist, genau vorhersagen zu können. Dies erfordert jedoch eine genaue Kenntnis der bei der herkömmlichen Baukonstruktion für gewöhnlich nicht angewandten Methoden.

Baustoffe

12.20 Bei der Wahl der Baustoffe muß berücksichtigt werden, daß die von einem plastisch verformten Gebäude absorbierte Energie wesentlich zum Widerstand gegen dynamische Belastung beitragen kann. Spröde Materialien, z. B. Glas, Gußeisen und nicht bewehrtes Mauerwerk, können keine über die Elastizitätsgrenze hinausgehenden Beanspruchungen aushalten, ohne daß ein Versagen durch Bruch eintritt. Beim Versagen können diese Baustoffe einen gefährlichen Splitterschlag verursachen; auch aus diesem Grunde sollten sie vermieden werden (s. Abschn. 12.35). Dagegen können elastische Baustoffe, z. B. Baustahl, Stahlbeton und bewehrtes Mauerwerk, größere

[1] Starre Scheiben sind Wände (oder Trennwände), die für horizontal auf die Wandfläche einwirkende Belastungen – im Gegensatz zu rechtwinklig zur Wand einwirkenden Belastungen – konstruiert sind. Natürlich können starre Scheiben auch so konstruiert werden, daß sie seitliche Belastungen aushalten.

plastische Verformungen erleiden, ohne zu versagen, und in vielen Fällen sogar ohne merklich an Widerstandsfähigkeit zu verlieren.

12.21 Stahlbeton bietet als Baustoff viele Vorzüge, weil er Eigenschaften aufweist, die für luftdrucksichere Bauten erwünscht sind. Die große Masse und die langsame Reaktion der verhältnismäßig schweren Bauteile sowie die mögliche Kontinuität tragen zur Widerstandsfähigkeit gegen seitlichen Druck bei. Beton kann für starre Scheiben verwendet werden, die Widerstand gegen Beschleunigung bieten und die Baukosten nur wenig erhöhen[1]). Die Unhandlichkeit der Bauteile kann zu mancherlei Einwänden Anlaß geben, obgleich dicke Betonwände dazu beitragen könnten, die Kernstrahlung abzuschwächen.

Luftdrucksichere mehrstöckige Gebäudetypen

12.22 Die Art und Anordnung eines Gebäudes, welches so konstruiert ist, daß es gegen Luftdruck Widerstand leistet, hängt in gewissem Umfange von seiner beabsichtigten Nutzung ab. Im allgemeinen erhöht sich die Widerstandsfähigkeit gegen seitliche Beanspruchung, die auf Luftdruck zurückzuführen ist, mit der Stoßfestigkeit, der Standfestigkeit, der Verformbarkeit und der Masse der Umfassungsbauteile und der Tragkonstruktion. Bestimmte Gebäudeformen aber sind ihrer Natur nach besser geeignet, Luftdruckbelastungen standzuhalten.

12.23 Wenn massive oder nahezu massive Außenwände und Queraussteifungswände bei einer den Funktionen des Bauwerks entsprechenden Planung zugelassen werden können, dann ist wohl ein Stahlbetonbauwerk mit starren Scheiben die zweckentsprechende und wirtschaftliche Konstruktion für ein mehrstöckiges Bauwerk. Gebäude mit starren Scheiben sind deshalb so widerstandsfähig, weil ihre Wände große seitliche Belastungen aushalten können. Diese Wände sind gewöhnlich im Vergleich zu den bei starren Scheiben verwendeten Balken und Säulen so steif, daß die gesamte translatorische Belastung im wesentlichen von diesen Wänden getragen wird.

12.24 Wo Innenwände als Brandmauern, Umfassungswände für Treppenhäuser oder als Trennwände erforderlich sind, kann man sie zweckmäßigerweise als starre Scheiben konstruieren. Diese Wände können dann dazu benutzt werden, senkrechte Lasten zu tragen; dadurch ersetzen sie das sonst für diese Zwecke verwendete Gerippe. Es ist jedoch zweckmäßig, bei tragenden Wand- und Deckenkonstruktionen die Verwendung nicht bewehrter Ziegel, Mauersteine oder Blocksteine zu vermeiden, weil sie gegen verhältnismäßig niedrige Drücke empfindlich sind, wenn sie rechtwinklig zu den Wänden einwirken.

12.25 Wenn die Nutzung des Gebäudes keine massiven (oder nahezu massiven) Außenwände erfordert, dann sind teilweise massive starre Scheiben an den Gebäudeenden zusätzlich zu den Brandmauern und befestigten Trennwänden, die als starre Scheiben konstruiert sind, zweckmäßig. Das ermöglicht die Verwendung leichter Säulen, die so konstruiert sind, daß sie die senkrecht einwirkenden Lasten für das

übrige Bauwerk tragen. Selbst wenn die starren Scheiben auf das Treppenhaus, den Fahrstuhlschacht und die Montagewände beschränkt bleiben, kann ein bedeutender Widerstandsgrad gegen den Luftdruck bei geringem Kostenaufwand erreicht werden.

12.26 Fensteröffnungen und leichte Ausfachungswände können vorteilhaft sein. Fenster und leichte Trennwände versagen schnell, ohne einen nennenswerten Widerstand zu leisten, wenn sie dem Luftdruck ausgesetzt sind. Dabei nimmt die seitliche Impulsbelastung infolge der Verkleinerung der tatsächlichen Widerstandsfläche ab, bevor eine stärkere Verformung eintritt. Obwohl diese Öffnungen die Schäden am Gerippe auf ein Mindestmaß begrenzen und die Gefahr des Verkantens verringern können, verstärken sie wahrscheinlich die Gefahr für die Menschen in dem Gebäude und die Zerstörung des Gebäudeinnern.

12.27 Beim Bau eines Stahlbetongebäudes ist es wichtig, daß bei allen Arbeitsfugen, die größeren Biege- oder Schubbeanspruchungen ausgesetzt sind, eine gute Kontinuität vorhanden ist, damit sie ein monolithisches Verhalten gewährleisten. Alle sich durchdringenden Wände und Decken sollten mit einer Bewehrung gut miteinander verankert werden, und die Arbeitsfugen zwischen dem vorher gegossenen und dem frischen Beton sollten so beschaffen sein, daß sie zwischen dem alten und dem neuen Beton eine bestmögliche Verbindung schaffen.

12.28 Ein Stahlbetonbauwerk mit starren Scheiben und Trennwänden mit guter Kontinuität reagiert wie eine einzige Zelle. Die Wände des Bauwerks leiten dann die Reaktionen von Fußboden und Decke zu den Fundamenten weiter. Auf diese Weise sind schwere Balken oder tragende Säulen überflüssig, und das Bauwerk ist trotzdem gegen Luftdruck widerstandsfähig.

12.29 Bei Stahlskelettbauten mit diagonalen Verspannungen besteht die Möglichkeit eines völligen Versagens durch örtlichen Bruch des Verspannungsmaterials. Um dies zu vermeiden, müssen die Verspannungen ausreichende Tragfähigkeit haben. Damit die Skelett-Teile voll ausgenutzt werden, sollte die Widerstandsfähigkeit der Endverbindungen einer diagonalen Aussteifung immer größer sein als die des Bauteils selbst.

12.30 Bei Reihenhäusern mit Stahlskeletten sollte die Widerstandsfähigkeit der Endverbindungen ausreichen, um die Bruchfestigkeit der Gerippeteile wirksam werden zu lassen. Wenn die Deckenplatten mit dem Traggerippe biege- und zugfest verbunden sind, um damit ein Zusammenwirken zu erreichen, dann tragen sowohl der Stahl als auch der Beton zur Widerstandsfähigkeit des Gerippes bei. Die Wandplatten sollten an dem Baugerippe so befestigt sein, daß die Verbindungen den Aufschlagsbelastungen und den positiven und negativen Lasten durch die Luftstoßwelle standhalten.

Verringerung der Luftdruckgefahr in vorhandenen Bauwerken

12.31 Neben der vorstehend erörterten Frage der Konstruktion von Neubauten besteht die Möglichkeit, vorhandene Gebäude so abzuändern, daß die durch den Luftdruck entstehenden Schäden am Gebäudeinnern und die Verletzungen von Per-

sonen verringert werden. Dieses Problem ist schwieriger als die Planung geeigneter Maßnahmen in Neubauprojekten. Die größte Gefahr für die in dem Gebäude befindlichen Menschen und Sachwerte ist der völlige oder teilweise Einsturz des Gebäudes. Deshalb muß das Gebäude analysiert werden, um seine schwachen Punkte zu entdecken und dann die beste Methode zu finden, diese Stellen widerstandsfähiger zu machen.

12.32 In der Regel ist es nicht möglich, das Gerippe eines Stahlbetonbauwerks widerstandsfähiger zu machen; es kann aber eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen Einsturz erreicht werden, indem man die Innenwände nach Möglichkeit durch starre Scheiben ersetzt. Zusätzliche Versteifungen können zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit eines Stahlgerippebauwerks beitragen.

12.33 Im ganzen gesehen, ist ein wichtiger Punkt die Verringerung der Gefahr für die Menschen in einem Gebäude, welches so widerstandsfähig ist, daß es selbst dann nicht einstürzt, wenn es stärker beschädigt wird. Gut zusammengefügte Wände aus Stahlbeton oder bewehrtem Mauerwerk mit Baustahl oder Stahlbetongerippe schaffen einen hochgradigen Schutz für die im Gebäude befindlichen Menschen. Bei dieser Konstruktion entsteht auch nur eine geringe Anzahl umherfliegender Trümmerstücke. Dagegen bieten weniger fest verbundene Wände aus unbewehrtem Mauerwerk innerhalb des Gebäudes fast gar keinen Schutz, und die Trümmerstücke würden auch innerhalb des Gebäudes umherfliegen.

12.34 Stahl- oder Stahlbetongerippe können dadurch widerstandsfähiger gemacht werden, daß man die Flächen zwischen den Säulen und Balken mit starren Scheiben ausfüllt. Die Stärke derartiger Wände hängt von ihrer Widerstandsfähigkeit und außerdem von der Widerstandsfähigkeit der Verbindungen zwischen den starren Scheiben und den Decken ab; denn wenn diese Wände zweckentsprechend sein sollen, müssen sie die seitlich einwirkenden Drücke zum Fundament weiterleiten. Der Einbau solcher starren Scheiben in einen Gerippebau schafft eine neue Konstruktion von stark erhöhter Widerstandsfähigkeit.

12.35 Bei allen Gebäuden, wie luftdrucksicher sie auch sein mögen, ist es wichtig, die Gefahr umherfliegender Glasstücke und Einrichtungsgegenstände, herunterfallender Beschläge und Zwischendecken auf ein Mindestmaß zu verringern. Beim Entwurf sollte die große Gefahr berücksichtigt werden, die den Menschen durch Glassplitter droht. Deshalb sollten Glasflächen nur so weit vorgesehen werden, als sie für die Nutzung des Gebäudes notwendig sind.

12.36 Zu berücksichtigen sind in vorhandenen Gebäuden auch die Gefahren durch Beschläge und schweren Zierputz oder sonstige Herrichtung des Gebäudeinnern, die durch den Luftdruck oder die Einsturzreaktion des Gebäudes sich loslösen könnten. Das beste wäre, all diese Gefahrenmomente nach Möglichkeit zu beseitigen. Wenn das nicht überall möglich ist, sollten doch wenigstens die durchführbar erscheinenden Maßnahmen getroffen werden. Vorstehende Gesimse und Aufsätze an der Außenseite eines Gebäudes sind eine Gefahr für alle in der Nähe befindlichen Personen. Ihre Beseitigung sollte deshalb in Erwägung gezogen werden. Obgleich die Gefahr des Splitterschlags nicht nur bei Kernwaffen besteht, ist sie doch wegen des hohen Druckes und der langen Dauer der Druckwelle hier stärker.

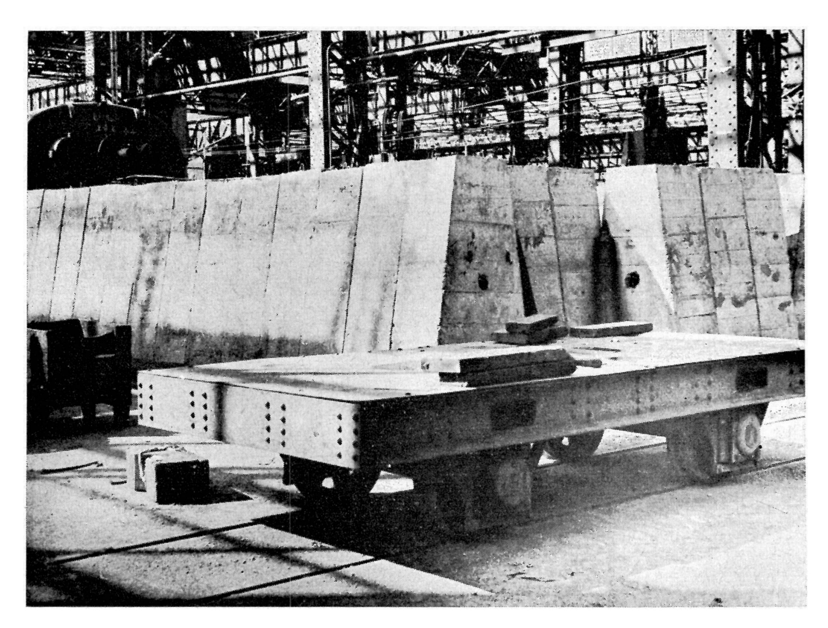


Bild 12.37a Splitterwände aus Stahlbetonfertigteilen (1,4 km vom Nullpunkt in Nagasaki)

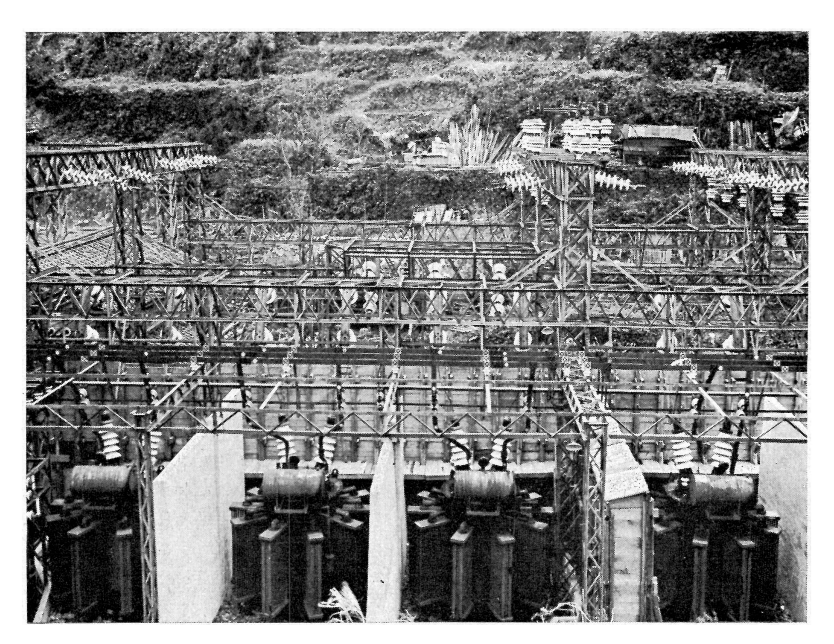


Bild 12.37b Stahlbeton-Splitterwände zum Schutze von Transformatoren (1,6 km vom Nullpunkt in Nagasaki)

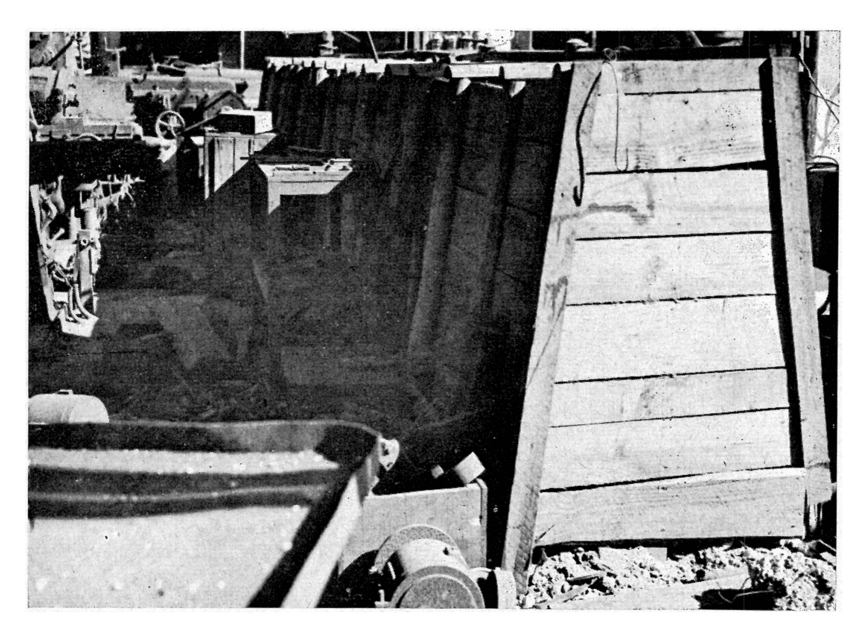


Bild 12.37c Mit Erde gefüllte Holzwandungen zum Schutze von Maschinen (1,4 km vom Nullpunkt in Nagasaki)

12.37 Splitterwände von der Art, wie sie zur örtlichen Abgrenzung der Schäden durch gewöhnliche Sprengkörper verwendet werden, können vielleicht in gewissem Umfange auch die Verletzungen durch Splitterschlag verringern und wichtiges Inventar schützen (Bild 12.37a und b). Besondere Sorgfalt sollte darauf verwendet werden, diese Wände widerstandsfähig gegen Verkanten zu machen. In Japan wurden sowohl Stahlbetonwände als auch mit Erde gefüllte Holzwandungen zum Schutze gegen Luftdruck verwendet (Bild 12.37c). Die ersteren waren zweckmäßiger, aber die letzteren verhinderten größere Schäden am Inventar, obwohl sie durch die Druckwelle des Atomsprengkörpers schwer beschädigt wurden.

Schutz durch Gräben und Erdabdeckungen

12.38 Obwohl es sich hier nicht um Bauwerke im oben erwähnten Sinn handelt, sollte doch auf den starken Schutz aufmerksam gemacht werden, der durch Gräben und Erdabdeckungen insbesondere bei solchen Zielen erreicht werden kann, die gegen Strömungswiderstand empfindlich sind. Eine Grube von geringer Tiefe bietet nur wenig Schutz; dagegen ist festgestellt worden, daß Gruben oder Gräben, die tiefer sind als das Ziel, den auf einen beliebigen Zielabschnitt einwirkenden Strömungswiderstand stark verringern können. Die seitliche Belastung wird hierbei



Bild 12.40a Dem Luftdruck auf freiem Felde ausgesetztes Abraumgerät (2,1 kg/cm² Überdruck)

weitgehend reduziert, und die Schäden werden hauptsächlich auf die Druckwirkung der Druckwelle beschränkt.

12.39 Die einzigen bisher als befriedigend festgestellten Schutzarten gegen den Strömungswiderstand sind ziemlich große Erdwälle (oder Erdbefestigungen) und tiefe Gräben, da diese verhältnismäßig unempfindlich gegen Luftdruck sind. Derartige Schutzgräben werden jedoch für eine Verwendung in Städten nicht empfohlen, da der hineinfallende Splitterschlag hier Schaden anrichten würde. Wälle aus Sandsäcken haben sich zwar zum Schutze gegen herkömmliche Sprengstoffe und Granaten als befriedigend erwiesen, sind jedoch gegen Luftdruck bei Kernwaffen unzureichend, da sie, wenn sie weggeschleudert werden, Schaden anrichten können.

12.40 In Bild 12.40a und b ist die durch eine Kernexplosion verursachte Zerstörung an zwei gegen Strömungswiderstand sehr empfindlichen Abraumgeräten gezeigt. In Bild 12.40c sieht man, daß zwei Maschinen ähnlicher Art, die in einem tiefen Graben in gleicher Entfernung von der Explosion standen, im wesentlichen unbeschädigt blieben. Zu erwähnen ist, daß der Graben im rechten Winkel zur Richtung der Luftdruckwelle lag. Hätte sich die Druckwelle in Richtung des Grabens bewegt, dann wären die Geräte wahrscheinlich schwer beschädigt worden. Deshalb ist bei der Schaffung eines Schutzes gegen Strömungskräfte die Lage des Grabens oder des Erdwalls zur voraussichtlichen Richtung der Explosion von großer Bedeutung.



Bild 12.40 b *Dem Luftdruck auf freiem Felde ausgesetztes Abraumgerät (2,1 kg/cm² Überdruck)*



Bild 12.40 c *In tiefem Graben rechtwinklig zur Luftdruckwelle stehendes Abraumgerät (2,1 kg/cm² Überdruck)*

Brandschutz

12.41 In Kap. VII war ausgeführt worden, daß Brände nach einer Kernexplosion durch thermische Strahlung und durch Nebenwirkungen, wie umstürzende Öfen und Herde, Gasrohrbrüche und elektrischen Kurzschluß entstehen können. Feuerbeständige Bauweise und Vermeidung von Textilien und anderen leichten, brennbaren Materialien sind zur Verringerung der Brandschäden wichtig. Wie aus den in Abschn. 7.82 beschriebenen Versuchen ersichtlich, geriet ein in gutem Zustande befindliches Haus mit einem Hof, der frei von brennbaren Abfällen war, durch thermische Strahlung weniger leicht in Brand als ein nicht ausreichend gesichertes Haus.

12.42 Die Methoden der feuersicheren Konstruktion und der Städteplanung sind bekannt und brauchen hier nicht behandelt zu werden. Ein besonderes Erfordernis ist die Verringerung der Brandgefahr auf Grund thermischer Strahlung durch Vermeiden von Reisighaufen und anderem zerkleinerten Brennmaterial sowie brennbarer, insbesondere dunkler Stoffe an den Fenstern oder sonstigen Öffnungen. In diesem Zusammenhang wurde empfohlen, alle derartigen Öffnungen von allen Seiten gegen die thermische Strahlung abzuschirmen. Das einfache Verfahren eines Kalkanstrichs der Fenster würde die Gefahr der Weiterleitung von thermischen Strahlen und die Wahrscheinlichkeit von Bränden, die im Gebäudeinnern ausbrechen, weitgehend verringern. Weitere praktische Möglichkeiten bietet die Verwendung von metallenen Fensterläden, reflektierenden Fensterscheibenanstrichen und nichtbrennbaren Zuggardinen in den Räumen.

12.43 Nach den in Japan gemachten Erfahrungen, wo die Zerstörungen ungeschützter Baugerippe zahlreich waren, erscheint es zweckmäßig, die Stahlstützen und sonstigen Stahlteile gegen Feuer zu schützen, insbesondere wenn das Gebäudeinnere brennbar ist oder wenn das Gebäude an brennbare Bauten angrenzt. Außerdem wurde in Japan festgestellt, daß schmale Brandschneisen von geringem Wert sind. Es ist deshalb sehr wichtig, daß die bei der Stadtplanung oder beim Abbruch von Häusern vorgesehenen Brandschneisen auch für große Flächenbrände ausreichen. Es wurde eine Mindestbreite von etwa 30 m empfohlen.

12.44 Eine der bedeutendsten Erkenntnisse, die aus den Atomangriffen auf Japan gewonnen wurden, ist die Notwendigkeit einer ausreichenden Wasserversorgung zur Brandbekämpfung. In Nagasaki betrug der Wasserdruck zur Zeit der Explosion 2,1 kg/cm², er fiel aber – hauptsächlich wegen der zahlreichen Rohrbrüche in den Häusern – bald auf 0,7 kg/cm². Am Tage nach der Explosion lag der Wasserdruck fast bei null. Dieses Nachlassen des Druckes trug weitgehend zu den ausgedehnten Brandschäden bei. Die in Hiroshima gemachten Erfahrungen waren ganz ähnlicher Art.

Personenschutzräume

Einleitung

12.45 Von einem vollkommenen Personenschutzraum müßte man verlangen, daß er Schutz gegen Luftdruck, Erdstöße, thermische Strahlen, Anfangsstrahlung (Neutronen und Gammastrahlen) und Rückstandsstrahlung aus radioaktivem Niederschlag (äußere und innere Quellen) bietet. Ein derartig vollkommener Schutzraum ist jedoch in Anbetracht der in Abschn. 12.2 dargelegten unberechenbaren Faktoren unmöglich zu erreichen. Deshalb muß eine Schutzraumkonstruktion – ebenso wie andere Gebäudekonstruktionen – unvermeidbar einen Kompromiß darstellen, der einen Risikofaktor einschließt. Zum Beispiel können unterirdisch angelegte Spezialkonstruktionen (s. Abschn. 12.53) Überdrücken von 7 kg/cm² oder mehr standhalten und die Kernstrahlung weitgehend abschwächen. Bei geeigneten Belüftungsanlagen können sie auch Schutz gegen radioaktiven Niederschlag sowie gegen chemische und biologische Kampfmittel bieten. Aber selbst diese Schutzräume würden bei einer Boden- oder Untererdexplosion wahrscheinlich zerstört, wenn sie in der Nähe des Nullpunktes lägen.

12.46 Es sind bereits verschiedene Arten von Personenschutzräumen konstruiert worden, und mehrere Typen sind Kernexplosionsversuchen ausgesetzt worden. Diese Schutzräume erstrecken sich auf geringe Abänderungen vorhandener Häuser für kleine Familien bis zu luftdrucksicheren Spezialkonstruktionen in Bauten, in denen ziemlich große Menschengruppen untergebracht sind. Bei unterkellerten Häusern können einfache, wenig aufwendige Schutzräume einen zusätzlichen Schutz bieten, der bei einem Atomangriff ein Überleben ermöglichen kann. Sind keine Keller vorhanden, so können andere zweckmäßige Maßnahmen getroffen werden, wenn sie auch mehr kosten würden.

12.47 Bei der Konstruktion von Spezialschutzräumen zum Schutze von Personen werden unterirdische (oder mit Erde abgedeckte) Bauten vorgezogen, da sie die Gefahren der thermischen und Kernstrahlung sowie des Luftdruckes bei mäßigem Kostenaufwand verringern. Bei der Konstruktion derartiger Schutzräume sind drei Grundprobleme stets zu bedenken:

1. die bauliche Konstruktion,
2. richtige Belüftung der belegten Räume,
3. Schaffung ausreichend geschützter Zugänge.

12.48 Die Erfahrungen der früheren Zeit bei Kernversuchen haben gezeigt, daß die gewöhnlichen Bauverfahren für die Konstruktion von unterirdischen Schutzräumen, die Überdrücken von 7 kg/cm² standhalten, ausreichend sind. Wenn in besonderen Fällen ein geringerer Ersatzdruck ausreichend erscheint, dann wird man es in der Regel für wirtschaftlicher halten, einen dicht unter der Erde gelegenen oder

einen mit Erde abgedeckten Schutzraum einfacherer Art zu verwenden. Zum Beispiel würden die in Tabelle 6.12 angeführten, leicht mit Erde abgedeckten oder überschütteten Bauten durch Überdrücke von 1,4 bis 2,1 kg/cm² nicht ernsthaft beschädigt werden. Empfindlicher gegen Luftdruck als die Bauten selbst sind die Leitungs- und Lüftungsanlagen, die für Luftzufuhr sorgen, sowie die Türen, Türrahmen und Zugangswege. Diese erfordern deshalb besondere Aufmerksamkeit.

12.49 Um eine ausreichende Versorgung mit unverstrahlter Luft während der kritischen Zeit der Benutzung des Schutzraumes zu sichern, müssen die Belüftungsanlage und Filter betriebsfähig sein. Dazu ist es erforderlich, daß die Zu- und Abluftleitungen mit einer luftdruckhemmenden Vorrichtung versehen werden. Derartige Vorrichtungen sollen die Intensität des Luftdrucks so weit verringern, daß die mechanischen Einrichtungen und Filter nicht beschädigt werden und der Luftdruck für die Personen in dem Schutzraum keine Gefahr darstellt.

12.50 Die Zugangswege zu den Schutzräumen müssen zum mindesten groß genug sein, daß sie für Personen frei zugänglich sind und evtl. auch den Fahrzeugverkehr aufnehmen. Außerdem ist es besonders wichtig, die Türen so zu konstruieren, daß sie einsturzsicher sind, da das Eindringen der Druckwelle durch eine Öffnung, wie z. B. eine Tür, einen plötzlichen so starken Druckanstieg im Innern des Gebäudes bewirken kann, daß er für die Insassen gefährlich wird. Wünschenswert ist stets, daß jeder Schutzraumeingang mit einem Zugangsweg so verbunden ist, daß er als luftdruckhemmende Vorrichtung wirkt und auch Schutz gegen Splitterschlag bietet, der die Tür beschädigen könnte.

Familien-(Heim-)Schutzräume

12.51 Wie aus Kap. IV ersichtlich, haben selbst in den Fällen, in denen die Kernexplosionen ausgesetzten Häuser durch einen Überdruck von 0,35 kg/cm² so schwer beschädigt wurden, daß sie unbewohnbar waren, die Keller nur wenig Schaden erlitten. Da keine nennenswerte Menge an thermischer Strahlung eindringen und die Tiefe des Erdreichs außerhalb des Gebäudes zu einer beträchtlichen Schwächung der Kernstrahlen führen kann, scheint es, daß Kellerräume die gleichen Möglichkeiten bieten wie Heimschutzräume. In Nevada sind mehrere Konstruktionen von Kellerschutzräumen erprobt worden.

12.52 In Häusern, die keine Keller haben oder in denen das Grundwasser es schwierig macht, einen Schutzraum unter Erdgleiche zu bauen, kann das Badezimmer so konstruiert werden, daß es als Innenschutzraum dienen kann. Dies kann dadurch erreicht werden, daß die Wände und Decke aus Stahlbeton gebaut werden und die Deckenplatte verstärkt wird. Fenster- und Türöffnungen sind durch Spezialdrucktüren geschützt. Ein Schutzraum dieser Art bietet guten Schutz gegen Luftdruck bis mindestens 0,35 kg/cm² Überdruck und auch gegen thermische Strahlung. Der Schutzgrad gegen Kernstrahlung hängt hauptsächlich von der Dicke der Betonwände und Decke ab; je größer die Dicke, desto größer der Schutzumfang.

Unterirdische Personenschutzräume

12.53 Wo vor, während und nach einem Kernwaffenangriff wichtige industrielle, zivile oder militärische Tätigkeit aufrecht erhalten werden muß, kann es wünschenswert sein, einen Sammelschutzraum zur Verfügung zu haben, der laufend belegt werden kann, wenn auch nicht unbedingt von den gleichen Personen. Einen Schutzraum dieser Art würde der allseitig geschlossene Typ darstellen, der mit einem geeigneten Belüftungssystem versehen sein müßte. Auf Grund verschiedener Versuche ist festgestellt worden, daß in »offenen« Schutzräumen, d. h. in Schutzräumen, in die die Druckwelle eindringen kann, die Überdruckspitze der Druckwelle sich nicht viel von der außerhalb vorhandenen Überdruckspitze unterscheidet. Eine gewisse Druckverringerung kann durch geeignete Konstruktion des Eingangs und durch Verwendung von Schutzwänden erreicht werden; jedoch ist man allgemein der Ansicht, daß an strategisch wichtigen Stellen, wo hohe Überdrücke zu erwarten sind, offene Sammelschutzräume nicht ausreichen würden.

12.54 In Bild 12.54 sind die Hauptmerkmale eines allseitig geschlossenen unterirdischen Personenschutzraumes gezeigt, der rund 30 Personen gleichzeitig aufnehmen, aber auch so erweitert werden kann, daß er eine größere Personenzahl faßt. Der Konstruktion sind die bei verschiedenen Kernversuchen gemachten Erfahrungen zugrunde gelegt, bei denen Schutzräume dieser Art Überdruckspitzen von etwa 7 kg/cm² standgehalten haben. Es wurde dabei auch, wie erwartet, festgestellt, daß eine beträchtliche Schwächung der Gammastrahlen und Neutronen möglich ist[1]).

12.55 Der Hauptschutzraum hat Stahlbetonwände von 38 cm Dicke; die Fußbodenplatte ist 46 cm und die Deckenplatte 53 cm dick. Der Schutzraum ist mit einer mindestens 1,50 m dicken Erdschicht abgedeckt. Der Zugang führt über Betonstufen, die in zwei Abschnitten rechtwinklig zueinander angelegt sind. Der Zugangsweg kann, statt in der auf der Zeichnung dargestellten Richtung zu verlaufen, auch um 180° gedreht werden, so daß die ganze Anordnung geschlossener wirkt. Die Treppe wird in Erdgleiche durch eine 20 cm dicke, waagerechte Tür aus Baustahl und Stahlbeton abgeschlossen. Die Tür hat vier Räder und läuft auf Schienen. Sie ist so konstruiert, daß sie beim Zurollen auf die beiderseits der Treppe befindlichen Stahlfundamente gelagert wird, so daß die Luftdrucklast von den Rädern und Achsen genommen wird. An der Unterseite der Treppendecke ist ein schwerer Hebel befestigt, so daß die Tür mit Gewalt geöffnet werden kann, falls sich in dem Treppenschacht hinter der Tür Trümmerstücke angehäuft haben.

12.56 Das Betreten und Verlassen des Schutzraumes erfolgt durch einen Zugang, der mit einer 1,27 cm dicken, gasdichten Stahltür (nach Art der Schotten bei der Marine) versehen ist. Als Notausgang ist ein 90 × 90 cm großer, senkrechter Ausstiegsschacht mit einer stählernen Falltür vorhanden. Normalerweise ist die Durch-

[1]) Der hier beschriebene Schutzraum war von der Federal Civil Defense Administration (Bundeszivilschutzverwaltung) zusammen mit dem »Army Ballistics Research Laboratory« (Ballistisches Forschungslaboratorium der Armee), dem »Army Chemical Center« (Chemisches Institut der Armee) und dem »Armed Forces Special Weapons Project« (Spezialwaffenabteilung der Streitkräfte) entworfen und geplant. Der bauliche Entwurf stammt von Ammann & Whitney, Beratende Ingenieure, gemäß Vertrag mit der FCDA.

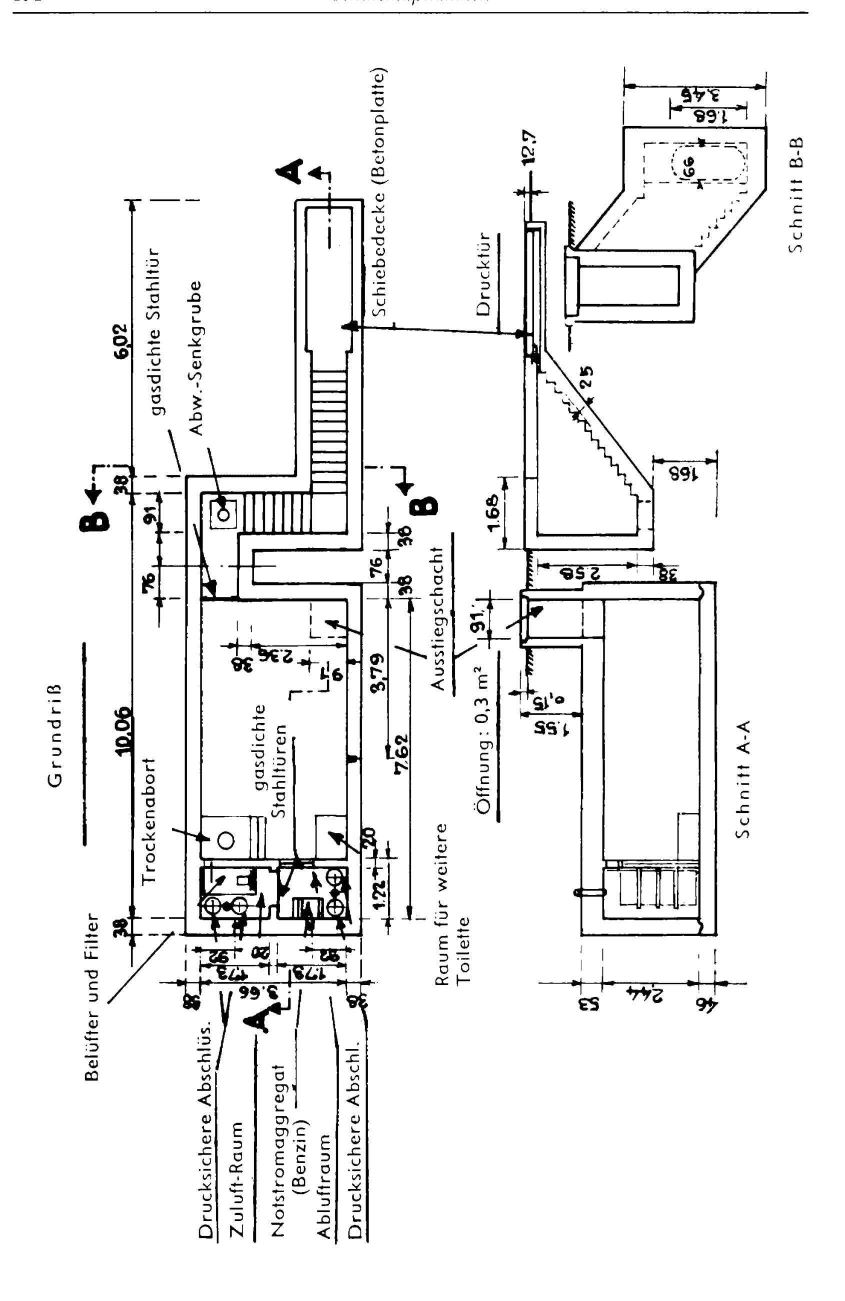


Bild 12.54 Schnitt eines unterirdischen Personenschutzraums

laßöffnung mit gewaschenem und getrocknetem Sand gefüllt; dieser kann aber abgelassen werden, und die Menschen können durch Erklettern einer in der Wand befindlichen senkrechten Leiter aussteigen.

12.57 Das Belüftungssystem für den Schutzraum ist in zwei abgeteilten Räumen enthalten, die ganz links in Bild 12.54 dargestellt sind. Die Außenluft tritt in den Einlaßraum ein, geht durch einen Filter, um z. B. radioaktiven Staub sowie biologische und chemische Kampfmittel zu beseitigen, und wird dann in den Schutzraum durch Zuleitungen in der Nähe der Decke eingeblasen. Die Abluft wird durch das Abluftventil in die Entlüftungskammer abgeleitet. Sowohl das Zuluft- als auch das Abluftsystem sind mit luftdruckdichten Spezialventilen versehen. Diese sind so konstruiert, daß sie sich bei einem plötzlichen Anstieg des Außendruckes infolge einer Druckwelle fast augenblicklich schließen. Ein Nachlassen des Druckes in der negativen Phase der Druckwelle wird sie dann wieder öffnen. Es ist festgestellt worden, daß die Ventile bei Überdruckspitzen bis mindestens 7 kg/cm^2 zufriedenstellend arbeiten.

12.58 Die Entlüftungskammer enthält auch einen benzinbetriebenen elektrischen Generator für Behelfszwecke bei Ausfallen der Hauptstromversorgung. Ein unterirdischer Tank faßt genügend Brennstoff für 10 Tage. Am anderen Ende des Schutzraumes ist ein eingegrabener Wassertank, der Wasser für Trinkzwecke liefert.

Behelfsschutzräume

12.59 Nach den bei Kern- und herkömmlichen Explosionen gewonnenen Erfahrungen bestehen kaum Zweifel daran, daß es im Freien in der Regel gefährlicher ist als innerhalb eines Gebäudes. Im Notfalle sollte deshalb der erste beste Schutzraum aufgesucht werden. Viele Untergrundbahnen könnten einen ziemlich guten Behelfsschutzraum darstellen, aber sie sind nur in einer begrenzten Anzahl von Städten vorhanden. Als eher verfügbarer Ersatz hierfür sollte der Keller eines Gebäudes gewählt werden. Hierbei ist ein feuerbeständiger Stahlbeton- oder Stahlgerippebau vorzuziehen, da dort nur geringe Wahrscheinlichkeit einer großen Trümmerlast über der Kellerdecke besteht. Selbst die Keller guter Gebäude sind jedoch kein ausreichender Ersatz für einen gut konstruierten Schutzraum, da die bei der Konstruktion zugrunde gelegte Verkehrslast der Decken über den Kellern im Vergleich zu dem Überdruck, dem diese Decken ausgesetzt sein könnten, für gewöhnlich nur gering ist.

12.60 Im Falle eines Überraschungsangriffs, wenn keine Gelegenheit vorhanden ist, in Deckung zu gehen, kann sofortiges Handeln Leben oder Tod bedeuten. Das erste Anzeichen einer unerwarteten Kernwaffenexplosion wird eine plötzliche Zunahme an Helligkeit sein. Dann darf man keinesfalls der instinktiven Neigung nachgeben, nach der Ursache der Lichtquelle zu sehen, sondern man muß alles nur Mögliche tun, alle ungeschützten Stellen des Körpers zu bedecken. Wer sich in einem Gebäude befindet, sollte sich sofort auf den Boden werfen und hinter oder unter einen Tisch oder ein Pult kriechen. Dies schafft einen Teilschutz gegen Glassplitter

und andere umherfliegenden Gegenstände. Es darf nicht versucht werden aufzustehen, bevor die Druckwelle, die sich durch Zersplittern von Glas, Abplatzen von Putz und andere Zeichen von Zerstörung bemerkbar gemacht hat, vorüber ist. Der Knall der Explosion kündigt ebenfalls die Ankunft der Druckwelle an.

12.61 Wer im Freien von dem plötzlichen Lichtblitz einer Kernwaffenexplosion überrascht wird, sollte sich zu Boden werfen und sich dabei so krümmen, daß bloße Arme, Hände, Hals und Gesicht mit bekleideten Körperteilen abgedeckt werden. Obwohl dieses Vorgehen wenig gegen die Gammastrahlen und Neutronen bewirkt, kann es evtl. doch dazu beitragen, die Verbrennungen durch thermische Strahlung zu verringern. Der Grad des erreichten Schutzes hängt von dem Explosionswert ab. Wie in Abschn. 7.53 gesagt, ist wahrscheinlich nur bei Kernwaffen mit hohem Explosionswert eine Abwehrbewegung gegen die thermische Strahlung möglich. Trotzdem ist durch eine solche Abwehrbewegung nichts verloren, aber vielleicht viel gewonnen. Die zusammengekrümmte Haltung sollte beibehalten werden, bis die Druckwelle vorüber ist.

12.62 Wenn innerhalb einer Sekunde irgendeine Deckung, so dürftig sie auch sein mag, in einem Hauseingang, hinter einem Baum oder in einem Graben erreichbar ist, kann man vielleicht einem großen Teil der Anfangsstrahlung sowie der thermischen Strahlung entgehen; jedoch erfordert die Abschirmung gegen Kernstrahlung eine beträchtliche Materialdicke, die im Freien wohl nicht vorhanden ist. Wenn man sich zu Boden wirft, kann man sich vielleicht durch den Boden und in der Nähe befindliche Objekte etwas abschirmen. Da aber die Kernstrahlung beim Aufsteigen der Atomwolke die Erde auch weiterhin erreicht, kann ein Schutz nur zum Teil erreicht werden. Außerdem kommen durch die Streuung Strahlungen aus allen Richtungen.

Schutz gegen radioaktiven Niederschlag

Passive und aktive Schutzmaßnahmen

12.63 Der Schutz gegen die Rückstandsstrahlung aus radioaktivem Niederschlag wirft eine Anzahl schwieriger Probleme auf, nicht nur, weil die Strahlungen unsichtbar sind und besondere Instrumente benötigt werden, um sie nachzuweisen und zu messen, sondern auch wegen der großen Reichweite und Wirkungsdauer des radioaktiven Niederschlags. Bei Bodenexplosion einer Kernwaffe von hohem Explosionswert kann sich das durch radioaktiven Niederschlag verstrahlte Gebiet wahrscheinlich weit über das Gebiet hinaus erstrecken, in welchem Verluste durch Luftdruck, thermische Strahlung und Anfangsstrahlung entstehen. Außerdem hält die Rückstandsstrahlung lange Zeit an, während die übrigen Wirkungen einer Kernexplosion in wenigen Sekunden vorüber sind.

12.64 Die gegen die Rückstandsstrahlungsquellen möglichen Schutzmaßnahmen gliedern sich in zwei Kategorien, nämlich die aktiven und die passiven Maßnahmen.

Beim passiven Schutz verbleibt man in dem verstrahlten Gebiet und schützt sich auf alle nur mögliche Weise insbesondere gegen die von den im radioaktiven Niederschlag vorhandenen Spaltungsprodukten ausgesandten Gammastrahlen. Wie wir in Kap. IX gesehen haben, kann schon der Keller eines Fachwerkhauses die Strahlung um einen Faktor 10 abschwächen, und in einem großen Gebäude oder einem mit 1 m Erdschicht abgedeckten Schutzraum ist noch eine weitere Abschwächung möglich.

12.65 In bezug auf den aktiven Schutz sind 2 Möglichkeiten zu erwähnen, und zwar einmal die Evakuierung, d. h. die Unterbringung der Bevölkerung eines verstrahlten Gebietes in einem anderen, nicht oder zumindest weniger verstrahlten Gebiet. Diese Maßnahme ist keineswegs so einfach, wie sie zunächst erscheinen mag, denn hierbei müssen die Menschen im allgemeinen durch verstrahlte Gebiete ohne Schutz hindurchgelangen und sind der Strahlung vielleicht viel stärker ausgesetzt als bei passiven Schutzmaßnahmen ohne Evakuierung.

12.66 Die andere Möglichkeit des aktiven Schutzes ist die Entstrahlung, nachdem der radioaktive Niederschlag sich abgesetzt hat. Meist können irgend welche Maßnahmen getroffen werden, um in kritischen Bereichen, z. B. auf Hausdächern und Straßen, die Menge des radioaktiven Niederschlags zu verringern. Einige der allgemeineren Entstrahlungsmethoden sind weiter unten behandelt. Zu erwähnen ist jedoch, daß die Maßnahmen stets gefährlich sind, da die hierfür eingesetzten Personen der Strahlung stark ausgesetzt werden.

12.67 Wieweit der passive Schutz, die Evakuierung und die Entstrahlung durchzuführen sind, hängt von den Umständen ab und kann in den einzelnen Fällen verschieden sein. Deshalb können keine bestimmten Vorschriften gemacht werden. Die jeweils zu ergreifenden Schritte müssen den verantwortlichen Stellen überlassen werden, die ihre Entscheidungen auf der Grundlage einer genauen Kenntnis der Strahlungsintensitäten und verschiedener anderer Faktoren sowie der Merkmale der Rückstandsstrahlung treffen. Einen Hinweis auf die vorhandenen Möglichkeiten enthalten die nachstehenden Abschnitte, in denen eine Reihe verschiedener Gegebenheiten behandelt ist.

Schutzmaßnahmen

12.68 Zu Beginn dieses Kapitels (Abschn. 12.3) war festgestellt worden, daß die Evakuierung der Bevölkerung aus den möglichen Zielgebieten durch die Wirkungen des radioaktiven Niederschlages stark erschwert wird. Hier sind nun einige Punkte erörtert, die zu bedenken sind, bevor große Menschenmengen in Bewegung gesetzt werden. Erstens besteht immer die Möglichkeit einer plötzlichen Änderung der Windrichtung, so daß die Evakuierten, ohne es zu wissen, sich vielleicht in Richtung des radioaktiven Niederschlags bewegen. Ähnliche Umstände können sich, nachdem die Evakuierung begonnen hat, durch weitere Explosionen an anderen Stellen ergeben. Auf jeden Fall ist die genaue Voraussage der Richtung des radioaktiven Niederschlags sehr schwierig und erfordert die genaue und ununterbrochene Feststellung der Wind-

richtung in einem großen Gebiet und bis zu großen Höhen. Ist einmal die Evakuierung angeordnet, dann ist es praktisch unmöglich, sie rückgängig zu machen oder auch nur die Hauptrichtung der Bewegung der Menschenmengen zu ändern.

12.69 Vielleicht ist es am zweckmäßigsten, zunächst passive Schutzmaßnahmen zu treffen, indem in verhältnismäßig geschlossenen Bauwerken Schutz gesucht wird. Die Gammastrahlen aus äußeren Quellen würden damit weitgehend abgeschwächt. Um zu verhindern, daß verstrahlte Stoffe in den Körper gelangen, kann ein Belüftungssystem mit Filtern zum Ausscheiden der Teilchen von Nutzen sein. Jedoch dringt in den meisten Bauten so viel Luft durch Risse oder durch die Wände ein, daß ausreichende Atmung selbst bei geschlossenen Türen und Fenstern möglich ist. Hierbei kann zwar gleichzeitig auch etwas radioaktiver Niederschlag eindringen, jedoch ist nach den Erfahrungen der Bewohner der Marshall-Inseln bei den Kernversuchen von 1954 (Abschn. 11.115ff) anzunehmen, daß das Einatmen der verstrahlten Teilchen keine ernste Gefahr darstellt.

12.70 Da je nach dem Grad der Verstrahlung im Freien die Schutzräume vielleicht 2 bis 7 Tage (oder länger) ununterbrochen benutzt werden müssen, sind Lebensmittel- und Wasservorräte nötig. Diese sollten zugedeckt aufbewahrt werden, damit keine Niederschlagsteilchen hineinkommen. Falls Wasser zur Verfügung steht, können die ungeschützt aufbewahrten Lebensmittel durch Abwaschen vor dem Essen entstrahlt werden (s. Abschn. 12.97).

12.71 An Orten, die verhältnismäßig nahe am Nullpunkt liegen, fällt der radioaktive Niederschlag bald nach der Explosion, und die Strahlungsdosisleistung ist anfangs sehr groß. Dann muß vielleicht mehrere Tage gewartet werden, bevor es möglich ist, aus dem Schutzraum herauszukommen, ohne Gefahr zu laufen, daß die Strahlungsdosisleistung noch schwere Schäden verursachen kann. Ein Verlassen des Schutzraums zwecks Evakuierung des Gebietes oder zwecks Einleitung vorläufiger Entstrahlungsmaßnahmen bedeutet auf jeden Fall ein Risiko, das nur in äußersten Notfällen und nicht ohne den Rat eines Helfers eingegangen werden sollte, der mit den Strahlungsverhältnissen in dem umgebenden Gebiet vertraut ist.

12.72 Je weiter ein Punkt auf der Bahn des radioaktiven Niederschlags von der Explosion – bei gleicher Richtung – entfernt ist, um so niedriger ist die Intensität der Anfangsstrahlung und um so kürzer ist die Dauer der passiven Schutzphase. In einem überall schwer verstrahlten Gebiet wird es jedoch erforderlich sein, einen oder 2 Tage nach der Explosion in Deckung vor der Rückstandsgammastrahlung zuzubringen. Zuerst ist die Radioaktivität der Spaltungsprodukte im Niederschlag noch sehr stark, aber nach 49 Stunden oder rund 2 Tagen ist sie auf etwa 1% des Wertes abgesunken, den sie 1 Stunde nach der Explosion hatte.

12.73 Es ist unmöglich, im voraus zu sagen, bei welcher Dosisleistung aus äußeren Quellen es zulässig sein kann, den Schutzraum zu verlassen. Es hängt viel davon ab, wieviel Zeit die Evakuierung oder die Entstrahlung erfordert und wie stark die bereits in der passiven Schutzphase einwirkende Gesamtdosis war. Die am Schluß dieses Kapitels angefügten graphischen Darstellungen sollen als Anleitung für die Berechnung der ungefähr einwirkenden Dosis bei verschiedenen Voraussetzungen

dienen. Solche Feststellungen sind notwendig, bevor Entscheidungen im Einzelfalle getroffen werden können.

12.74 Zu Beginn dieser Abhandlung war vorausgesetzt worden, daß zwischen der Explosion und dem Absetzen des radioaktiven Niederschlages einige Zeit vergeht. Wenn aus irgendeinem Grunde keine vorherige Warnung erfolgt, sind die zu ergreifenden Maßnahmen ähnlich wie die vorstehend beschriebenen. Der erste Schritt wäre das sofortige Aufsuchen des bestmöglichen Schutzraumes, der die aus äußeren Quellen herrührenden Gammastrahlen so weit wie möglich abschwächt. Äußerste Eile ist erforderlich, da die Strahlungsintensität des radioaktiven Niederschlags gleich nach der Explosion außerordentlich groß ist, im Laufe der Zeit aber ziemlich rasch abnimmt. Nach einigen Tagen können der Schutzraum verlassen und die Menschen auf einem Wege evakuiert werden, der ein Mindestmaß an Bestrahlung gewährleistet.

12.75 Es muß hier betont werden, daß das Vorhandensein von gefährlichem radioaktivem Niederschlag dem Auge vielleicht nicht sichtbar ist; zu seinem Nachweis braucht man geeignete strahlungsempfindliche Instrumente. Allerdings war auf den Marshall-Inseln bei der Versuchsexplosion vom 1. März 1954 etwas radioaktiver Niederschlag (wenn auch nicht alles) als weißes Pulver oder Staub wahrnehmbar. Die Ursache hierfür war aber wohl die helle Farbe des Kalziumoxyds (oder Karbonats), aus dem die Teilchen in der Hauptsache bestanden. Wäre der Stoff etwas dunkler und die Teilchen von etwas kleinerem Durchmesser gewesen, dann wäre der radioaktive Niederschlag möglicherweise nicht sichtbar gewesen. Eine laufende Kontrolle der Kernstrahlung mit geeigneten Instrumenten ist also wohl in allen Gebieten in der Nähe der Explosion von großer Bedeutung.

Radiologische Überwachung

12.76 Aus mehreren Gründen müssen bald nach einer Kernexplosion radiologische Überwachungen durchgeführt werden. Zunächst kann es erforderlich werden, daß Rettungsmannschaften ein verstrahltes Gebiet betreten; deshalb muß die Strahlungsintensität des betreffenden Gebietes bekannt sein. Es müssen die besten, d. h. die am wenigsten verstrahlten Wege in und durch das Gebiet festgestellt werden. Ferner brauchen die in einem verstrahlten Gebiet in Schutzräumen befindlichen Menschen Angaben über die Strahlung von außerhalb, damit sie ihre Evakuierung planen können. Überdies müssen die stark verstrahlten Gebiete festgestellt und gekennzeichnet werden, um zufälliges Betreten zu verhüten.

12.77 Die schnellste Methode, die Strahlungsgefahr nach der Explosion abzuschätzen, ist wahrscheinlich das Strahlenspüren aus der Luft. Die großen Vorteile liegen hierbei darin, daß ohne Rücksicht auf die Trümmer, die die Straßen unpassierbar machen, oder auf den Grad der Verstrahlung das Strahlenspüren durchgeführt werden kann. Die Gammastrahlen aus den Spaltungsprodukten an der Erdoberfläche können wegen ihrer großen Reichweite in der Luft mit sehr feinen Instrumenten in einer Höhe von über 1000 m nachgewiesen werden. In geringer Höhe fliegende Flug-

zeuge oder Hubschrauber, die mit Geräten zur Messung der Gammastrahlendosisleistung ausgestattet sind, können nach einem vorher festgelegten Plan ein betroffenes Gebiet überfliegen. Die ersten Flüge werden vielleicht in einer Höhe von etwa 450 m durchgeführt, wo die Strahlungsintensität um einen Faktor von fast 100 im Vergleich zu der am Erdboden vorhandenen Intensität verringert ist (s. Bild 9.122). Danach könnten Flüge in geringerer Höhe folgen, um die verstrahlten Gebiete erforderlichenfalls genauer ermitteln zu können.

12.78 Die mit Meßinstrumenten in einem Flugzeug in bekannter Höhe festgestellte Strahlungsintensität ermöglicht eine ungefähre Schätzung der an der Erde oder an der Wasseroberfläche vorhandenen Dosisleistung, z. B. in Röntgen/Stunde. Das genaue Verhältnis zwischen den Meßergebnissen in der Luft und der Dosisleistung an der Erdoberfläche hängt von mehreren Faktoren ab, einschließlich der Art des Geländes und der Zeit nach der Explosion, in der die Messung durchgeführt wurde, denn die Energie der Gammastrahlung aus Spaltungsprodukten nimmt allmählich ab. Falls keine genaueren Angaben zur Verfügung stehen, können die Daten des Bildes 9.122 verwendet werden, um den Schwächungsfaktor in einer bestimmten Höhe im Verhältnis zu dem am Erdboden zu berechnen.

12.79 Die Luftüberwachungen sind wichtig, denn sie können schnell durchgeführt werden und wertvolle Angaben liefern, die auf andere Weise unmöglich zu erhalten sind. Trotzdem können solche Messungen nur als ungefähre Anleitung dienen und müssen durch Beobachtungen am Erdboden ergänzt werden. Die aus dem Strahlenspüren aus der Luft erhaltenen Angaben sind jedoch für die Planung der Bodenüberwachungen von großem Wert. In der ersten Zeit nach der Explosion wird nur das Gesamtausmaß des verstrahlten Gebietes festgestellt; später wird jedoch eine eingehendere Untersuchung angestellt, um die Strahlungsintensität an bestimmten strategischen Punkten zu ermitteln, die ungefähre Kontur der betreffenden Dosisleistungen festzulegen und die »heißen Stellen« auszumachen, an denen die Verstrahlung über dem Durchschnitt liegt.

12.80 Es muß berücksichtigt werden, daß die Rettungsmannschaften bei ihrer Arbeit laufend Strahlungen von manchmal starker Intensität ausgesetzt sind. Sie sollten nach Möglichkeit mit Fahrzeugen befördert werden, die durch Schwächung der Gammastrahlung, z. B. durch geeignete Abschirmung oder Abstand einigen Schutz bieten. Um eine zu starke, gefährliche Bestrahlung zu verhüten, müssen die Rettungsmannschaften Meßgeräte mit sich führen, die jederzeit die von ihnen aufgenommene Gesamtdosis anzeigen. Sie wissen dann, wann sie an ihre Standorte zurückzukehren haben, damit bisher unbestrahlte Mannschaften ihren Platz einnehmen und die Arbeit fortsetzen können. Wenn die Ergebnisse der vorläufigen Messungen vorliegen, ist vielleicht eine Vorausplanung an Hand der am Schluß des Kapitels angefügten graphischen Darstellungen möglich.

Entstrahlungsverfahren[1]

12.81 Da radioaktive Stoffe nicht vernichtet werden können, muß bei der Entstrahlung unbedingt die Strahlungsquelle, d. h. der radioaktive Niederschlag, von dem Ort, wo er eine Gefahr darstellt, an einen anderen Ort geschafft werden, wo er wenig oder gar keinen Schaden anrichten kann. Deshalb sind die Entstrahlungsverfahren mit zweierlei Aufgaben verbunden:

1. Wegräumen der verstrahlenden Stoffe,
2. ihre Beseitigung.

Wenn der letzteren Aufgabe nicht genügend Beachtung geschenkt wird, kann das ganze Verfahren von geringem oder gar keinem Nutzen sein. Durch Abdecken der verstrahlenden Stoffe, ohne sie zu entfernen, z. B. durch Abdeckung mit einer Erdschicht könnten beide Aufgaben wirksam miteinander verbunden werden.

12.82 Die Entstrahlung kann entweder nur behelfsmäßig oder gründlich durchgeführt werden. Behelfsmäßige Entstrahlung wäre die rasche, teilweise Beseitigung oder Abdeckung der Stoffe in großem Maßstab. Damit soll erreicht werden, daß die Strahlungsdosisleistung so rasch wie möglich auf einen Wert reduziert wird, bei dem die Rettungsmannschaften ein Gerät benutzen oder zumindest auf begrenzte Zeit in dem Gebiet bleiben können. Später kann dann eine gründliche Entstrahlung durchgeführt werden, die einen langen und eingehenden Prozeß darstellt. In der Regel kann die Entstrahlung niemals vollständig sein; das ist auch nicht erforderlich. Sie sollte jedoch so weit durchgeführt werden, daß bei den durchzuführenden Arbeiten keine Gefahr mehr besteht.

12.83 Die Entscheidung darüber, ob die Entstrahlung durchgeführt werden soll, hängt von den Umständen ab und ist stets mit einem Risiko verbunden. Da die Hilfsdienste immer etwas gefährdet sind, sollte die Entstrahlung so lange wie möglich hinausgeschoben werden, damit der natürliche radioaktive Zerfall ausgenutzt werden kann. In manchen Fällen mögen dringende Maßnahmen erforderlich sein, dann muß mit der Entstrahlung begonnen werden, wenn die Strahlungsintensität noch sehr stark ist. In solchen Fällen können die Hilfskräfte durch neue, noch nicht der Strahlung ausgesetzte Mannschaften in kurzzeitigen Abständen ersetzt werden.

12.84 In bezug auf die Verstrahlung und die Entstrahlung sind zwei Grundsätze zu beachten. Der radioaktive Niederschlag neigt auf Grund seiner Teilchennatur deutlich dazu, sich an waagerechten Flächen zu sammeln. Solche Flächen werden also stärker verstrahlt als senkrechte Flächen. Deshalb können zumindest bei der behelfsmäßigen Entstrahlung die letzteren zurückgestellt werden. Die meisten Teilchen des radioaktiven Niederschlags können leicht durch einen Wasserstrahl oder durch Abkehren, am besten mit einem Staubsauger, entfernt werden, um ein Einatmen von Staub zu vermeiden.

[1] Eine ausführliche Untersuchung über Entstrahlungsmethoden und -einrichtungen findet man in dem Handbuch (TM-11-6) mit dem Titel »Radiological Decontamination in Civil Defense«, herausgegeben von der Federal Civil Defense Administration.

12.85 Die behelfsmäßige Entstrahlung kann im allgemeinen auf die eine oder andere der vorstehenden Arten durchgeführt werden. Bei glatten, z. B. gestrichenen und metallenen Flächen können die nassen (Abwasch-)Methoden angewandt werden, aber bei porösem Material, z. B. bei Stoffen, Ziegeln, Beton und Steinen, sind trockene Methoden vorzuziehen. Im großen ganzen kann das Abwaschen mit Wasser im Freien und außen an Fahrzeugen erfolgen, während das Staubsaugen für das Innere von Gebäuden und Fahrzeugen geeigneter ist. Versuche mit Entstrahlungsverfahren haben gezeigt, daß verstrahlte Stoffe zum größten Teil mit diesen einfachen Methoden beseitigt werden können. Nur ein kleiner Teil der strahlenden Teilchen haftet fest und erfordert gründlichere Behandlung, z. B. mit Chemikalien oder Abreibungsmitteln[1]).

12.86 In den Städten könnte die Entstrahlung durch Abspritzen der Dächer und der Straßen mit einem scharfen Wasserstrahl durchgeführt werden. Auf diese Weise würde das radioaktive Material in die Regengosse geleitet werden, wo es nur eine geringe Gefahr darstellt. Im Innern eines Hauses könnte die Dosisleistung auch verringert werden, indem der Erdboden um das Gebäude mit unverstrahlter Erde abgedeckt wird oder indem die oberste Erdschicht mit einer Planierraupe entfernt wird.

12.87 Im Zusammenhang mit der Beseitigung von verstrahlter Erde ist es für die vorstehend beschriebenen Zwecke oder für die Schaffung einer Beseitigungsmöglichkeit wichtig festzustellen, daß die Gammastrahlen aus Spaltungsprodukten große Entfernungen in der Luft zurücklegen können. In einer Höhe von 90 cm über dem Erdboden z. B. kommen rund 50% der in der Mitte eines großen, flachen, gleichmäßig verstrahlten Gebietes empfangenen Dosisleistung aus Entfernungen von über 7,5 m und etwa 25% aus Entfernungen von über 15 m. Somit würde die völlige Beseitigung der verstrahlten Fläche aus einem Umkreis, dessen Radius 15 m beträgt, die Dosisleistung in der Mitte auf etwa $^1/_4$ ihres ursprünglichen Wertes verringern. Wird aber die verstrahlte Erde nicht vollständig beseitigt, sondern nur außerhalb des Kreises gebracht, dann ist die Dosisleistung wesentlich größer als ein Viertel des Anfangswertes.

12.88 Es liegt deshalb auf der Hand, daß – sofern Durchgangsmöglichkeiten über freies, weithin verstrahltes Land gefunden werden müssen – ein Wegräumen der obersten Schicht verstrahlter Erde nach den Seiten nur dann ausreichend ist, wenn dadurch eine breite Bahn freigelegt würde. Wenn also der Streifen 75 m breit ist, wird die Strahlungsdosisleistung in der Mitte auf ein Zehntel des vor der Freilegung vorhandenen Wertes verringert. Ein ähnliches Ergebnis erreicht man, indem man die oberste Bodenschicht abträgt und sie in frischem Boden untergräbt. Etwa 30 cm Erdschicht würden erforderlich sein, um die Dosisleistung um einen Faktor 10 zu verringern.

12.89 Stark verstrahlte Kleider sowie Teppiche, Vorhänge und Polstermöbel sind nicht mehr brauchbar und müssen vergraben oder an isolierten Plätzen aufgehoben werden. Wenn die Radioaktivität genügend abgeklungen ist oder wenn die anfängliche Verstrahlung nicht zu stark ist, wäre ein Waschen von Kleidern und

[1]) Die Verstrahlung durch neutroneninduzierte Strahlung ist schwieriger zu entfernen, sie ist aber nur in der Nähe d. Expl.-Zentrums von Bedeutung (s. 9.18).

Stoffen zur Verringerung der Radioaktivität zweckmäßig, damit sie wieder gebraucht werden können. Bei Möbeln kann sorgfältiges Staubsaugen ausreichend sein, aber das Gerät müßte vor weiterem Gebrauch mit einem Instrument überprüft werden.

Schutz der Rettungsmannschaften

12.90 Alle Mannschaften, die ein verstrahltes Gebiet zum Strahlenspüren betreten und die Entstrahlung oder sonstige Hilfsmaßnahmen durchführen, sollten ihre Kleidung so herrichten, daß kein Staub eindringen kann. Der Hauptzweck dieser Vorsichtsmaßnahme ist es, die Möglichkeiten von »Betaverbrennungen« auf ein Mindestmaß zu begrenzen. Diese Verbrennungen entstehen, wenn der radioaktive Niederschlag direkt mit der Haut in Berührung kommt (Abschn. 11.94). Es ist natürlich zu bedenken, daß die Kleidung praktisch keinen Schutz gegen Gammastrahlung bietet, deshalb besteht diese Gefahr immer noch unvermindert.

12.91 Für trockene Arbeiten werden Hosen und Schuhe aus schwerem Material sowie Arbeitshandschuhe und eine fest anliegende Kappe empfohlen. In staubigen Gebieten ist es ratsam, daß Hosen und Ärmelenden (über den Handschuhen) zusammengebunden werden, damit das verstrahlte Material an diesen Stellen nicht eindringen kann. Ein Schal um den Hals würde ebenfalls zweckmäßig sein. Staub kann nach einem Kernwaffenangriff aus Schutt, aus Erdaufwürfen usw. aufsteigen, ohne daß er unbedingt radioaktiv ist. Dennoch ist es in jedem Fall richtig, Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, damit keine zu großen Staubmengen eingeatmet werden. Aus diesem Grunde sind bei Arbeiten, bei denen große Mengen Staub aufgewirbelt werden, Staubbrillen und Filtermasken ratsam.

12.92 Bei nassen Entstrahlungsarbeiten sind wasserabstoßende Kleidung, Gummihandschuhe und Gummischuhe nötig (Bild 12.92). Sie können mit einem Wasserstrahl gereinigt und mehrere Male getragen werden, sofern sie keine Brüche oder Risse aufweisen.

12.93 Die Hilfskräfte brauchen außer den Maßnahmen, die zu treffen sind, um eine Berührung der Haut mit radioaktivem Material zu verhüten, einen Schutz gegen zu starke Bestrahlung. Zu diesem Zwecke sollten alle Hilfskräfte automatische Meßgeräte mit sich führen, die auch »Dosimeter« genannt werden und die gesamte Bestrahlung anzeigen. Es sind verschiedene Arten von Dosimetern entwickelt worden, und es sind einfache und zuverlässige Instrumente erhältlich, die billig und in großen Mengen hergestellt werden[1]).

12.94 Meßgeräte zur Feststellung der Strahlungsintensität (Dosisleistung) sind erforderlich, um die Gebiete starker Radioaktivität zu ermitteln und die zulässigen Aufenthaltszeiten in einem verstrahlten Gebiet zu berechnen. In der Regel sind Instrumente, die die Gammastrahlen-Dosisleistung messen, ausreichend. Außerdem

[1]) Eine Beschreibung des Dosimeters und anderer Strahlungsmeßgeräte, die die FCDA entwickelt hat, ist in der Broschüre »Radiological Instruments for Civil Defense« (Radiologische Instrumente für den Zivilschutz) enthalten (TB-11-20).

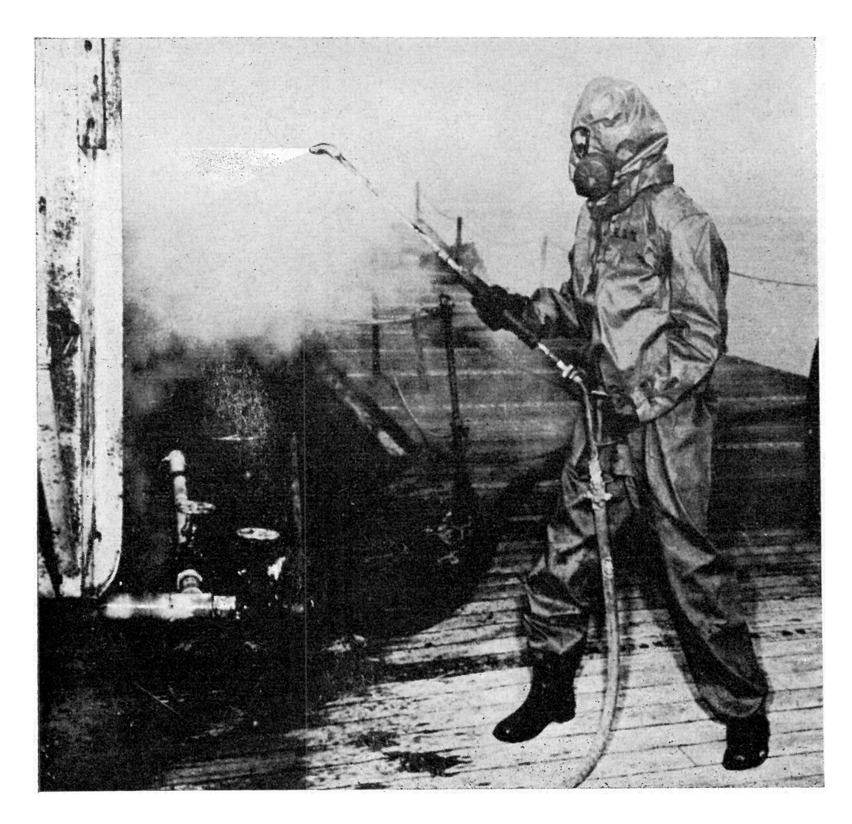


Bild 12.92 Wasserabstoßende Kleidung für nasse Entstrahlungsarbeiten

sind gegen Betastrahlungen empfindliche Spezialgeräte zweckmäßig, um Betateilchenstrahler am Körper nachzuweisen.

12.95 Im Zusammenhang mit diesem Gesichtspunkt des Schutzes der Rettungsmannschaften erhebt sich die Frage, welche Menge Kernstrahlung für die Personen zulässig ist, die sich an den Rettungsarbeiten beteiligen. Es ist schwierig, wenn nicht gar unmöglich, hierauf eine präzise Antwort zu geben, denn es hängt viel von den Umständen und dem unvermeidbar einzugehenden Risiko ab.

12.96 Wenn bei Rettungsaktionen sofortiges Handeln erforderlich ist, kann selten vorausgesagt werden, welche Strahlungsdosis hierbei aufgenommen werden könnte. Deshalb sind auch die Auswirkungen bei den bestrahlten Personen nicht vorauszusagen. Wenn jedoch die Gefahr nach den verfügbaren Unterlagen über die Dosisleistung errechnet werden könnte, dann wäre es möglich, einen ungefähren Anhaltspunkt für die zulässige Bestrahlung im Ernstfalle festzulegen[1]).

---

[1]) Siehe z. B. »Emergency Exposures to Nuclear Radiation«, Federal Civil Defense Administration Technical Bulletin TB-18-1.

Lebensmittel und Wasser

12.97 Ordnungsgemäß zugedeckte oder eingewickelte oder in geschlossenen Behältern aufbewahrte Lebensmittel dürften wenig oder gar nicht verstrahlt werden. Das gilt sowohl für Konserven und den Inhalt von Flaschen als auch für andere Waren in undurchlässigen, staubsicheren Hüllen. Wenn nur die Außenseite verstrahlt ist, brauchen nur die radioaktiven Niederschlagsteilchen, die sich evtl. außen am Behälter abgesetzt haben, sorgfältig entfernt zu werden, z. B. durch Abwaschen. Auch Gemüse kann durch Waschen ausreichend entstrahlt werden. Wenn dann noch die äußeren Schichten entfernt werden, z. B. durch Abschälen, müßten die Lebensmittel für den Verbrauch völlig ungefährlich sein. Ungeschützte Lebensmittelerzeugnisse von unterschiedlicher Absorptionsfähigkeit, die verstrahlt wurden, sollten durch Vergraben beseitigt werden.

12.98 Bezüglich der Nährmittel, die in verstrahltem Boden gewachsen sind, liegen noch keine ausreichenden Angaben vor. Es können von der Pflanze einige radioaktive Isotope aufgenommen worden sein, aber ihre Art und Menge ist im einzelnen verschieden und hängt wahrscheinlich auch von der Bodenart ab (Abschn. 9.99). Zur Zeit weiß man nur, daß die in verstrahltem Boden gewachsenen Pflanzen mit Mißtrauen anzusehen sind, bis ihre Ungefährlichkeit durch radiologische Instrumente erwiesen ist.

12.99 Die meisten Quellen der öffentlichen Wasserversorgung liegen in ziemlich großer Entfernung vom Stadtzentrum, das vielleicht das Ziel eines Kernwaffenangriffs ist. Trotzdem kann eine starke Verstrahlung entstehen, wenn die Wasserbehälter im Bereich starken radioaktiven Niederschlags aus einer Bodenexplosion liegen. Auch können radioaktive Niederschlagsteilchen in einen Fluß oder in ein Reservoir fallen, oder der Atomsprengkörper explodiert in der Nähe eines Reservoirs. In den meisten Fällen ist zu erwarten, daß durch Einwirken mehrerer Faktoren, z. B. Verdünnung durch Fließen, natürlichen Zerfall und Absorption durch den Erdboden das Wasser zumindest im Notfall genießbar wird, abgesehen vielleicht von der kurzen Zeit unmittelbar nach der Kernexplosion. In jedem Falle wird, wenn das Wasser aus einem Reservoir in der üblichen Weise behandelt wird – einschließlich der Koagulation, Sedimentierung und Filtrierung –, ein großer Teil des radioaktiven Materials beseitigt.

12.100 Da der Erdboden die Fähigkeit hat, durch den »Adsorptionsprozeß« bestimmte Elemente aufzunehmen und zurückzuhalten, sind unterirdische Wasserquellen im allgemeinen unverstrahlt. Aus dem gleichen Grunde können in mittlerer Tiefe liegende Brunnen, selbst wenn sie unter verstrahltem Erdreich liegen, als ungefährliche Trinkwasserquellen benutzt werden, vorausgesetzt, daß – wie es fast ausnahmslos der Fall ist – keine direkte Leitung von der Erdoberfläche in den Brunnen hinein vorhanden ist.

12.101 In manchen Städten wird das Wasser direkt aus einem Fluß entnommen und vor der Weiterleitung für den privaten Verbrauch nur gechlort. Das Wasser kann mehrere Tage lang für den Verbrauch ungeeignet sein, aber durch die Verdünnung

und den natürlichen Zerfall wird der Grad der Verstrahlung mit der Zeit immer schwächer. In solchen Fällen ist es erforderlich, das Wasser auf Radioaktivität untersuchen zu lassen und die Wasserversorgung einzustellen, bis keine Gefahr mehr besteht. Wenn die Verstrahlung auf den Spaltungsprodukten beruht, so gelten die in Tabelle 12.101 aufgeführten zulässigen Beta- oder Gammaaktivitäten für Notfälle. Die Werte beziehen sich auf Zeiträume von 10 bzw. 30 Tagen. Wenn also angenommen wird, das Wasser wird regelmäßig 30 Tage gebraucht, dann beträgt die höchstzulässige Radioaktivität 3×10^{-2} Microcurie/cm³ (s. Abschn. 9.125ff). Wenn dagegen der Zeitraum kürzer ist, dann kann im Notfalle Wasser von entsprechend höherer Radioaktivität verbraucht werden.

Tabelle 12.101 Zulässige Beta- oder Gamma-Aktivität im Trinkwasser in Notfällen

Verbrauchszeit Tage	Microcurie/cm³	Zerfall pro Sek. und pro cm³
10	9×10^{-2}	3×10^{3}
30	3×10^{-2}	1×10^{3}

12.102 Die für Notfälle geltenden Grenzen für Alphateilchenstrahler, wie Uran und Plutonium, im Wasser liegen wesentlich unter den in Tabelle 12.101 angegebenen. Wahrscheinlich bedeuten aber diese Elemente nur in seltenen Fällen eine Verstrahlungsgefahr im Trinkwasser.

12.103 Wenn die normale Wasserversorgung keine andere Behandlung erfährt als das Chloren und wenn eine andere Quelle nicht zur Verfügung steht, sollten für Notfälle bei einer Verstrahlung Ionenaustauscher verwendet werden. Die Wasserenthärtungsmittel im Haushalt können in kleinerem Maßstabe dem gleichen Zweck dienen. Übrigens könnte auch das in einem Heißwasserspeicher im Haushalt vorhandene Wasser, sofern es abgelassen werden kann, ohne daß verstrahltes Wasser hinzukommt, als Notvorrat dienen.

12.104 In Krankenhäusern und auf Schiffen kann im Notfall genügend Wasser durch Destillieren beschafft werden. Nach den Kernversuchen auf Bikini im Jahre 1946 wurde festgestellt, daß verstrahltes Meereswasser nach Destillierung vollkommen unschädlich war; die radioaktiven Substanzen blieben in den Verdampfungsrückständen und den Salzrückständen zurück. Es ist jedoch zu betonen, daß das bloße Abkochen von Wasser, das durch radioaktiven Niederschlag verstrahlt ist, in bezug auf die Beseitigung der Radioaktivität völlig zwecklos ist.

Strahlungsdosis und Strahlungszeit in verstrahlten Gebieten

12.105 Für die Planung von Verteidigungsmaßnahmen aktiver oder passiver Art oder für Messungen in einem mit Spaltungsprodukten verstrahlten Gebiet muß entweder die zulässige Aufenthaltszeit bei einer bestimmten Dosis berechnet werden,

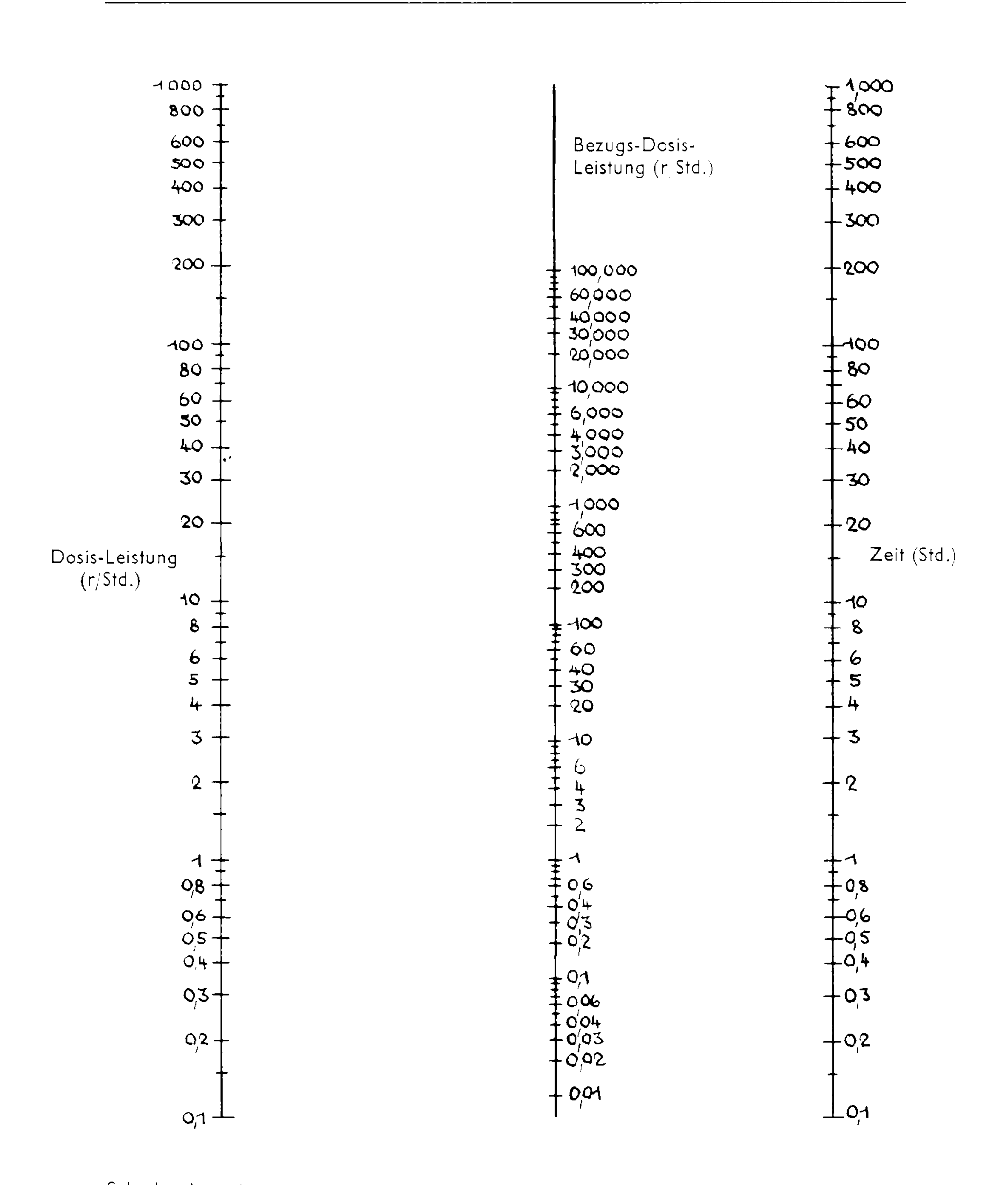


Bild 12.106 Berechnung der Dosisleistung aus Spaltungsprodukten im radioaktiven Niederschlag

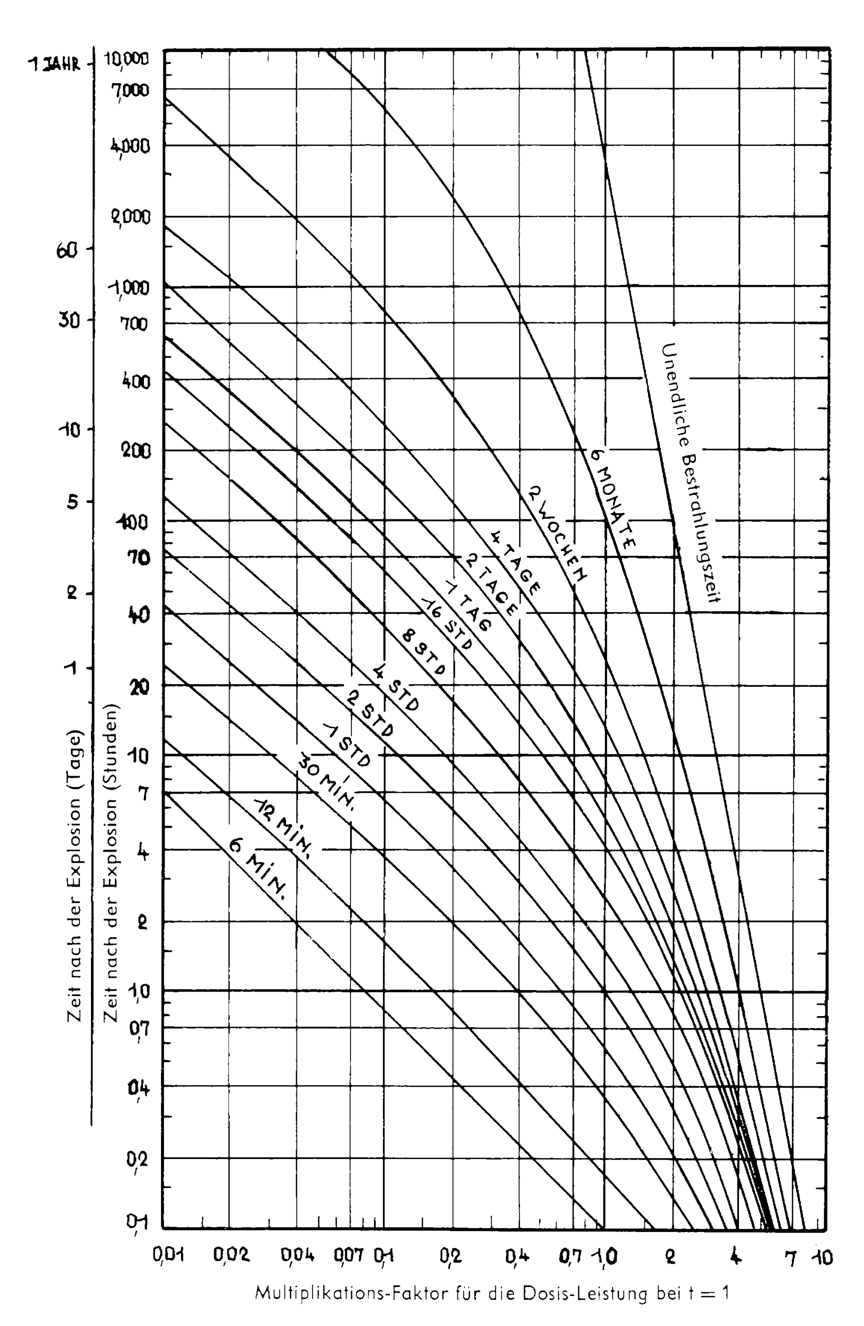


Bild 12.107 Gesamte (angesammelte) Strahlungsdosis

oder es muß die Dosis ermittelt werden, die in einer bestimmten Zeit aufgenommen wird. Die Gleichungen und die dazugehörigen graphischen Darstellungen sind in Kap. IX enthalten, aber die gleichen Ergebnisse können in anderer Form ausgedrückt werden, die für viele Zwecke geeigneter ist[1]).

12.106 Wenn die Strahlungsdosisleistung aus Spaltungsprodukten zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Punkt bekannt ist, dann kann Bild 12.106 herangezogen werden, um die Dosisleistung zu einem anderen Zeitpunkt am gleichen Ort zu ermitteln, vorausgesetzt, daß keine Veränderung des radioaktiven Niederschlags außer dem natürlichen radioaktiven Zerfall eingetreten ist. Die gleiche Rechentafel kann auch benutzt werden, um die Zeit nach der Explosion zu ermitteln, in der die Dosisleistung einen bestimmten Wert erreicht hat. Haben sich die Umstände zwischen den beiden in Frage kommenden Zeiten irgendwie geändert, vielleicht durch weitere Verstrahlung oder durch Entstrahlung, dann sind die aus Bild 12.106 erhaltenen Ergebnisse nicht gültig.

12.107 Um die gesamte während einer bestimmten Aufenthaltszeit in einem verstrahlten Gebiet aufgenommene Strahlungsdosis zu ermitteln, wenn die Dosisleistung in diesem Gebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt ist, wird Bild 12.107 in Verbindung mit Bild 12.106 herangezogen. Die Tabelle kann auch dazu benutzt werden, um den Zeitpunkt abzuschätzen, zu welchem eine bestimmte Aufgabe in Angriff genommen werden kann, um eine bestimmte Gesamtstrahlungsdosis nicht zu übersteigen.

12.108 Eine andere Art der Berechnung der Strahlungsdosis in einem verstrahlten Gebiet beruht auf der Kenntnis der Dosisleistung zur Zeit des Betretens des Gebietes. Das neben Bild 12.107 beschriebene Verfahren, wozu auch die Heranziehung von Bild 12.106 erforderlich ist, kann dann angewandt werden, um entweder die gesamte in einer bestimmten Aufenthaltszeit aufgenommene Dosis oder die Zeit ermitteln zu können, die erforderlich ist, um eine bestimmte Strahlungsdosis anzusammeln. Die Berechnung kann jedoch mit Hilfe des Bildes 12.108 vereinfacht werden; es ist dann nicht nötig, die Bezugsdosisleistung zur Zeit $t = 1$ zu bestimmen, sofern die Dosisleistung zur Zeit des Betretens des verstrahlten Gebietes bekannt ist.

12.109 Wenn der gesamte radioaktive Niederschlag ein bestimmtes Gebiet innerhalb kurzer Zeit erreichen würde, dann könnte Bild 12.108 herangezogen werden, um festzustellen, wie die von den Bewohnern des betr. Gebietes aufgenommene Gesamtstrahlungsdosis mit der Zeit zunehmen würde, wenn kein Schutz vorhanden wäre. Nimmt man z. B. an, daß der radioaktive Niederschlag 6 Stunden nach der Explosion sich absetzt und die Dosis zu diesem Zeitpunkt R Röntgen/Stunde beträgt; die gesamte empfangene Dosis wäre $8\,R$ Röntgen in einem Tage, $11\,R$ Röntgen in 2 Tagen und $13\,R$ Röntgen in 5 Tagen.

12.110 Wir sehen, daß etwa der erste Tag nach der Explosion in bezug auf die Rückstandsstrahlung aus radioaktivem Niederschlag am gefährlichsten ist. Obwohl

[1]) Geräte ähnlich den Rechenschiebern, wie sie in der Fußnote zu Abschn. 9.11 erwähnt sind, sind für Berechnungen der hier beschriebenen Art sehr zweckmäßig.

die vorstehenden Werte auf den angegebenen Fall anwendbar sind, d. h. vollständiges Absetzen des radioaktiven Niederschlags 6 Stunden nach der Explosion, gelten die allgemeinen Schlußfolgerungen in allen Fällen. Die Strahlungsdosis, die während der ersten 1–2 Tage aufgenommen würde, ist bedeutend stärker als an den folgenden Tagen. Deshalb ist gerade in der ersten Zeit nach der Explosion der Schutz gegen radioaktiven Niederschlag von größter Bedeutung.

Die Rechentafel zeigt die Beziehung zwischen der Dosisleistung zu einer beliebigen Zeit nach der Explosion und dem Bezugswert bei $t = 1$ Stunde (R_1). Wenn die Dosisleistung zu einem beliebigen Zeitpunkt bekannt ist, dann kann die Dosisleistung zu einem beliebigen anderen Zeitpunkt aus der Tafel abgeleitet werden. Ebenso kann die Zeit nach der Explosion, zu der eine bestimmte Dosisleistung erreicht wird, ermittelt werden.

Beispiel:

Gegeben: die Strahlungsdosisleistung auf Grund radioaktiven Niederschlags an einem bestimmten Punkt beträgt 6 Stunden nach der Kernexplosion 8 Röntgen/Stunde.

Suche: a) die Dosisleistung 24 Stunden nach der Explosion;

b) die Zeit nach der Explosion, zu der die Dosisleistung 1 Röntgen/Stunde beträgt.

Lösung: Mittels eines Lineals verbinde den Punkt, der auf der linken Skala 8 Röntgen/Stunde bezeichnet, mit dem Punkt $t = 6$ auf der rechten Skala. Die Gerade schneidet die mittlere Skala bei 70 Röntgen/Stunde; das ist der Bezugswert der Dosisleistung (R_1) bei $t = 1$.

a) Mit dem Lineal verbinde diesen Bezugspunkt (70 r/h) mit dem Punkt auf der rechten Skala, der 24 Stunden nach der Explosion bezeichnet, und verlängere die Gerade, um die entsprechende Dosisleistung auf der linken Skala abzulesen, d. h. 1,5 r/h.

b) Verlängere die Gerade, die auf der linken Skala die Dosisleistung von 1 r/h mit dem Bezugswert von 70 r/h auf der mittleren Skala verbindet bis zur rechten Skala. Diese wird bei 34 Stunden nach der Explosion geschnitten.

Aus dem Kurvenblatt kann die gesamte, aus Spaltungsprodukten des radioaktiven Niederschlags während einer bestimmten Aufenthaltsdauer in einem verstrahlten Gebiet aufgenommene Strahlungsdosis ermittelt werden, wenn die Dosisleistung zu einer bestimmten Zeit nach der Explosion bekannt ist. Ebenso kann die Zeit für den Beginn eines Einsatzes errechnet werden, der eine bestimmte Aufenthaltszeit und eine vorgeschriebene Gesamtstrahlungsdosis erfordert.

Beispiel:

Gegeben: die Dosisleistung 4 Stunden nach einer Kernexplosion beträgt 6 Röntgen/Stunde.

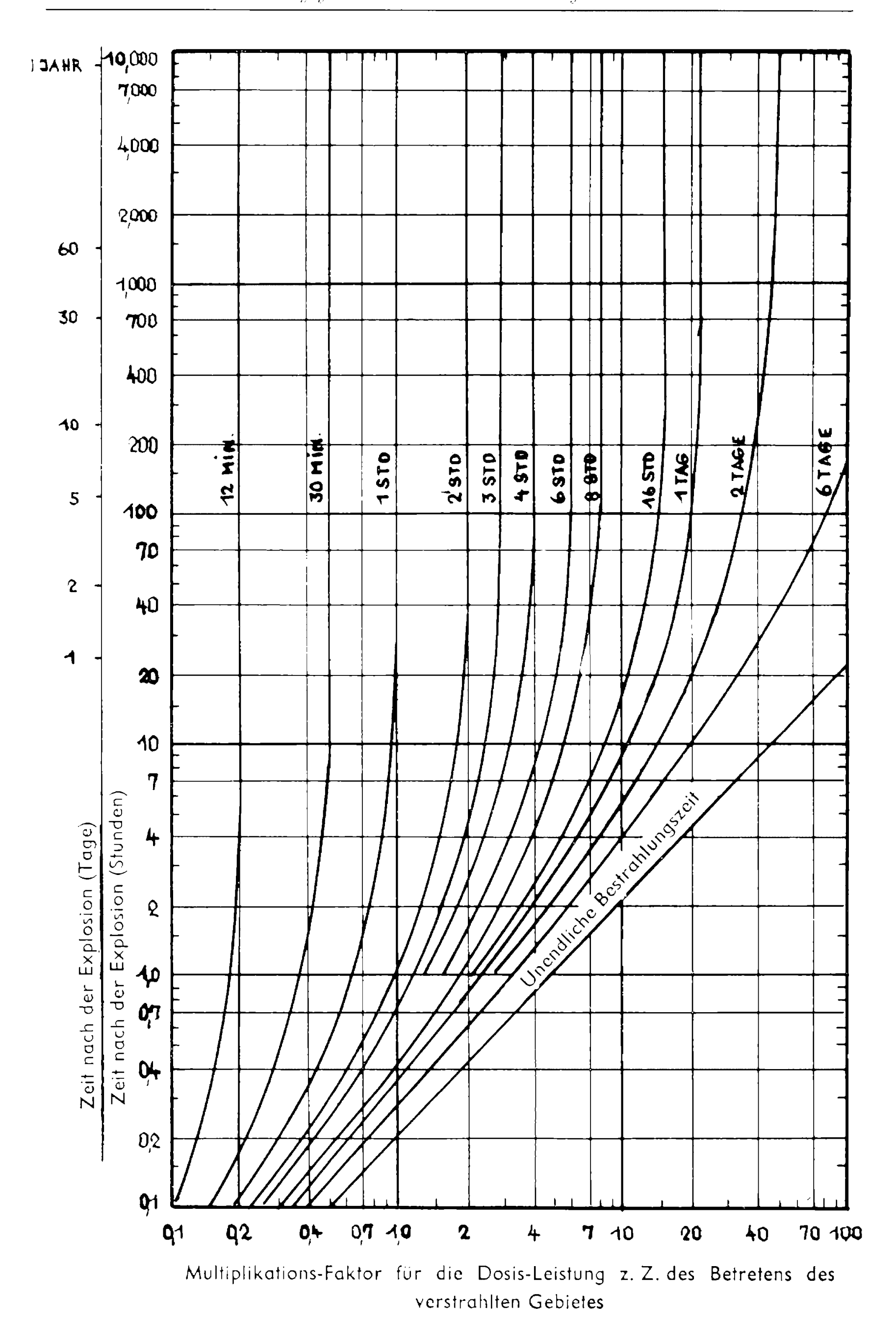


Bild 12.108 Gesamte (angesammelte) Strahlungsdosis

Suche: a) die gesamte, während eines Zeitraums von 2 Stunden empfangene Dosis, beginnend 6 Stunden nach der Explosion.

b) die Zeit nach der Explosion, zu der ein Einsatz begonnen werden kann, der eine Aufenthaltszeit von 5 Stunden erfordert, bei einer Gesamtdosis von 4 Röntgen.

Lösung: Zunächst ist die Bezugsdosisleistung bei $t = 1$ (R_1) zu bestimmen. Nach Bild 12.106 schneidet die Gerade, welche 6 r/h auf der linken Skala mit 4 Stunden auf der rechten Skala verbindet, die mittlere Skala bei 32 r/h; das ist der Wert für R_1.

a) Beginne in Bild 12.107 bei 6 Stunden nach der Explosion (senkrechte Skala) und ziehe durch bis zu der Kurve, die eine Aufenthaltszeit von 2 Stunden bezeichnet. Die entsprechende Ablesung auf der waagerechten Skala, die den Multiplikationsfaktor angibt, um R_1 auf die geforderte Gesamtdosis umzurechnen, wird mit 0,19 ermittelt. Demnach beträgt die aufgenommene Gesamtdosis

$0{,}19 \times 32 = 6{,}1$ Röntgen.

b) Da die Gesamtdosis mit 4 Röntgen angegeben ist und R_1 32 r/h ist, ist der Multiplikationsfaktor $4/32 = 0{,}125$. Beginnen wir in Bild 12.107 an diesem Punkt auf der waagerechten Skala und gehen aufwärts bis zu der (interpolierten) Kurve für eine Aufenthaltszeit von 5 Stunden, dann stellen wir die entsprechende Ablesung auf der senkrechten Skala, die die Zeit nach der Explosion angibt, mit 19 Stunden fest.

Aus dem Kurvenblatt kann die gesamte, aus Spaltungsprodukten des radioaktiven Niederschlags während einer bestimmten Aufenthaltszeit in einem verstrahlten Gebiet aufgenommene Strahlungsdosis ermittelt werden, wenn die Dosisleistung zur Zeit des Betretens des verstrahlten Gebietes bekannt ist. Ebenso kann die Aufenthaltszeit errechnet werden, wenn die Gesamtdosis vorgeschrieben ist.

Beispiel:

Gegeben: bei Betreten des verstrahlten Gebietes 12 Stunden nach der Kernexplosion beträgt die Dosisleistung 5 r/h.

Suche: a) die gesamte, während einer Aufenthaltszeit von 2 Stunden empfangene Strahlungsdosis.

b) die Aufenthaltszeit für eine Gesamtdosis von 10 Röntgen.

Lösung: a) Wir beginnen in Bild 12.108 an dem Punkt, der 12 Stunden nach der Explosion auf der senkrechten Skala bezeichnet und ziehen durch bis zu der Kurve, die eine Aufenthaltszeit von 2 Stunden bezeichnet. Der Multiplikationsfaktor für die Dosisleistung zur Zeit des Betretens des

verstrahlten Gebietes wird auf der waagerechten Skala mit 1,9 abgelesen. Also beträgt die empfangene Gesamtdosis

$1{,}9 \times 5 = 9{,}5$ Röntgen.

b) Die Gesamtdosis beträgt 10 Röntgen, und die Dosisleistung zur Zeit des Betretens des Gebietes beträgt 5 r/h. Also ist der Multiplikationsfaktor $10/5 = 2{,}0$. Wir beginnen in Bild 12.108 an dem Punkt, der 2,0 auf der waagerechten Skala entspricht, und gehen aufwärts bis zu einer waagerechten Linie, die an dem Punkt beginnt, welcher 12 Stunden nach der Explosion auf der senkrechten Skala bezeichnet. Wir sehen, daß sich die beiden Geraden an einem Punkt schneiden, der eine Aufenthaltszeit von etwa $2^1/_3$ Stunden bezeichnet.

Begriffsbestimmungen

Abschirmung: Material oder Hindernis, das die Strahlung absorbiert und deshalb Personen oder Materialien vor den Wirkungen einer Kern-(oder Atom-)Explosion schützen kann. Eine Schicht von mittlerer Dicke eines undurchsichtigen Materials bietet ausreichenden Schutz gegen thermische Strahlung, aber zur Abschirmung gegen Kernstrahlung kann eine beträchtliche Dicke von Material großer Dichte erforderlich sein.

Absorptionskoeffizient: Zahl, die die Fähigkeit eines Materials kennzeichnet, Strahlungen von bestimmter Energie zu absorbieren. Der *lineare Absorptionskoeffizient* drückt diese Fähigkeit je Dickeneinheit aus und wird in Einheiten reziproker Länge (oder Dicke) angegeben. Der *Massenabsorptionskoeffizient* ist gleich dem linearen Absorptionskoeffizienten, dividiert durch die Dichte des absorbierenden Materials; er ist ein Maß für die Absorptionsfähigkeit je Masseneinheit.

Alphateilchen: Teilchen, das aus dem Kern einiger radioaktiver Elemente von selbst emittiert wird. Es ist mit dem Heliumkern identisch, der eine Masse von 4 Einheiten und eine elektrische Ladung von 2 positiven Einheiten aufweist. Siehe *Radioaktivität.*

Anfangsstrahlung: Kernstrahlung (im wesentlichen Neutronen und Gammastrahlen), die aus dem Feuerball und der Rauchsäule in der ersten Minute nach einer Kern-(oder Atom-)Explosion emittiert werden. Die Zeitgrenze von einer Minute ist etwas willkürlich als die Zeit festgesetzt worden, die die Quelle der Strahlungen (Spaltungsprodukte in der Atomwolke) braucht, um eine solche Höhe zu erreichen, daß nur unbedeutende Mengen zur Erdoberfläche gelangen. Siehe *Rückstandsstrahlung.*

A-Sprengkörper: Abkürzung für Atomsprengkörper.

Atom: das kleinste (oder letzte) Teilchen eines Elements, das noch die Merkmale dieses Elements aufweist. Jedes Atom besteht aus einem positiv geladenen zentralen Kern, der fast die ganze Masse des Atoms trägt und von einer Anzahl negativ geladener Elektronen umgeben ist, so daß das ganze System elektrisch neutral ist. Siehe *Element, Elektron, Kern.*

Atomsprengkörper (oder -waffe): Ausdruck, der manchmal für eine Kernwaffe angewandt wird, bei der nur Spaltungsenergie nutzbar gemacht wird. Siehe *Spaltung, Kernwaffe.*

Atomzahl: siehe *Kern.*

Atomgewicht: das relative Gewicht von einem Atom eines Elements. Als Bezugsbasis wird das Atomgewicht von Sauerstoff mit genau 16 angenommen; das Atomgewicht von Wasserstoff (dem leichtesten Element) ist dann 1,008. Demnach ist das Atomgewicht eines Elements etwa gleich dem Gewicht von einem Atom dieses Elements, bezogen auf das Gewicht eines Wasserstoffatoms.

Atomwolke: Gesamtbegriff für die Mischung aus heißen Gasen, Rauch, Staub und sonstiger Materie aus dem Sprengkörper selbst und seiner Umgebung; sie wird zusammen mit dem aufsteigenden Feuerball in die Höhe getragen, der durch die Explosion einer Kern-(oder Atom-)Waffe entsteht.

Belastung: die auf ein Objekt oder Bauwerk oder einen Gebäudeteil einwirkende Kraft. Die Belastung durch den Luftstoß ist gleich dem Gesamtdruck, der den umgebenden Druckwert, multipliziert mit der Fläche des belasteten Objekts usw., übersteigt.

Betateilchen: geladenes Teilchen von sehr geringer Masse, das aus dem Kern bestimmter radioaktiver Elemente von selbst emittiert wird. Die meisten (wenn nicht alle) Spaltungsfragmente emittieren (negative) Betateilchen. Physikalisch ist das Betateilchen

identisch mit einem sich mit hoher Geschwindigkeit bewegenden Elektron. Siehe *Elektron, Spaltungsfragmente, Radioaktivität.*

Beugung: Umbiegen von Wellen an den Kanten von Objekten. Bei der auf ein Gebäude auftreffenden Luftstoßwelle bezieht sich die Beugung auf das Wandern der Luftstoßwelle um das Gebäude und dessen Umhüllung durch die Luftstoßwelle. Die *Beugungslast* ist die Kraft (oder Last), die während des Beugungsprozesses auf das Bauwerk einwirkt.

Biologische Halbwertszeit: siehe *Halbwertszeit.*

Blitzverbrennungen: Verbrennung durch übermäßige Bestrahlung (der bloßen Haut) mit thermischen Strahlen. Siehe *thermische Strahlung.*

Bodenexplosion: Explosion einer Kern-(oder Atom-)Waffe an der Erd- oder Wasseroberfläche oder in einer Höhe über der Oberfläche, die geringer ist als der Radius des Feuerballs bei maximaler Helligkeit (im zweiten Wärmeimpuls). Siehe *Luftexplosion.*

Bodenwalze: Wolke, die sich vom unteren Teil der bei einer Untererdexplosion entstehenden Säule nach außen fortwälzt. Bei Unterwasserexplosion ist die Walze eine Wolke aus flüssigen (Wasser-)Tropfen, die die Eigenschaft hat, fast so zu fließen wie eine homogene Flüssigkeit. Bei Untererdexplosion besteht die Walze aus kleinen, festen Teilchen, verhält sich aber ebenfalls wie eine Flüssigkeit. Bei Untererdexplosion begünstigt weicher Erdboden die Bildung der Bodenwalze.

Chemischer Dosimeter: selbstanzeigendes Gerät zur Ermittlung der gesamten (oder angesammelten) Bestrahlungsdosis auf der Basis von Farbveränderungen bei chemischen Reaktionen, die durch Strahlung hervorgerufen werden.

Curie: Einheit für Radioaktivität; die Menge einer beliebigen Art von Radioaktivität, bei der $3{,}700 \times 10^{10}$ nukleare Zerfallsprozesse je Sekunde vorkommen. Das *Gammacurie* wird manchmal dementsprechend als die Materialmenge definiert, bei der die Anzahl der Zerfallsprozesse je Sekunde von einer Gammastrahlen-Emittierung begleitet ist.

Deuterium: Wasserstoffisotop mit zwei Masseneinheiten; es wird manchmal auch »schwerer Wasserstoff« genannt. Kann bei thermonuklearen Verschmelzungsreaktionen zur Auslösung von Energie verwendet werden. Siehe *Verschmelzung, Thermonuklear.*

Dom: Aufwurf aus Wasserstaub hoch in die Luft, wenn die Stoßwelle aus der Unterwasserexplosion einer Kern-(oder Atom-)Waffe die Oberfläche erreicht.

Dosierung: siehe *Dosis.*

Dosimeter: Instrument zum Messen und Aufzeichnen der gesamten akkumulierten ionisierenden Bestrahlungen. Siehe *Dosimetrie.*

Dosimetrie: Lehre und Anwendung der Grundbegriffe und Verfahren der Messung und Aufzeichnung von Strahlungsdosen. Die praktische Seite der Dosimetrie bezieht sich auf den Gebrauch verschiedener Arten von Strahlungsmeßgeräten. Siehe *Chemischer Dosimeter, Filmplakette, Überwachungsgerät.*

Dosis: die (gesamte oder angesammelte) Menge ionisierender (oder Kern-)Strahlung. Der Begriff Dosis wird oft im Sinne der »Bestrahlungsdosis«, gemessen in Röntgen, angewandt, d. i. die Maßeinheit für den gesamten Ionisierungsgrad, den die Strahlungsmenge in der Luft verursachen könnte. Zu unterscheiden von der »absorbierten Dosis«, die in rep oder rad ausgedrückt wird und die aus der Strahlung absorbierte Energie je Gramm eines bestimmten Körpergewebes darstellt. Die »biologische Dosis«, die in rem ausgedrückt wird, ist eine Maßeinheit für die biologische Wirkung der Bestrahlung. Siehe *RAD, RBE, REM, REP, Röntgen.*

Dosisleistung: in der Regel die Menge ionisierender (oder Kern-)Strahlung, der ein Mensch je Zeiteinheit ausgesetzt sein würde. Sie wird für gewöhnlich in Röntgen je Stunde oder in einem Mehrfachen oder Bruchteilen dieser Einheiten, z. B. Milliröntgen je Stunde, ausgedrückt. Die Dosisleistung wird meist verwendet, um den Grad der Radioaktivität in einem verstrahlten Gebiet anzugeben.

Durchlässigkeit (atmosphärische): der Teil (oder Prozentsatz) der Wärmeenergie, die an einem bestimmten Punkt aufgenommen wird, nachdem die Wärmeenergie die Atmosphäre durchwandert hat, im Verhältnis zu dem Teil Wärmeenergie, der am gleichen Punkt aufgenommen würde, wenn keine Atmosphäre vorhanden wäre.

Dynamischer Druck: Luftdruck, der sich aus dem Massenluftstrom (oder Wind) hinter der Stoßfront einer Luftdruckwelle ergibt. Er ist gleich dem Produkt der halben Dichte der Luft, durch die sich die Luftdruckwelle bewegt, und dem Quadrat der Teilchen-(oder Wind-)Geschwindigkeit in der auf das Objekt oder Bauwerk auftreffenden Welle.

Elastischer Bereich: Beanspruchungsbereich, in dem ein Material seine ursprüngliche Form wieder annimmt, wenn die Kraft (oder Belastung) beseitigt ist. »Elastische Verformung« bezieht sich auf größenmäßige Veränderungen, die innerhalb des elastischen Bereichs eintreten. Siehe *Plastischer Bereich.*

Elektron: Teilchen von sehr geringer Masse, das eine Einheit negativer oder positiver Ladung trägt. Die den Kern umgebenden negativen Elektronen sind in allen Atomen vorhanden; ihre Anzahl ist gleich der Zahl der positiven Ladungen (oder Protonen) in dem betr. Kern. Der Begriff »Elektron« bezieht sich, wenn er allein verwendet wird, für gewöhnlich auf diese negativen Elektronen. Ein positives Elektron wird allgemein »Positron« genannt, und ein negatives Elektron wird manchmal auch »Negatron« genannt. Siehe *Betateilchen.*

Element: eine der verschiedenen in der Natur vorkommenden Grundarten von Materie, die einzeln oder in Verbindungen Substanzen verschiedener Art bilden. Man kennt ungefähr 90 verschiedene, in der Natur vorkommende Elemente; mehrere weitere Elemente einschließlich des Plutoniums hat man durch Kernreaktionen bei diesen Elementen erhalten.

Entstrahlung: Verringerung oder Beseitigung strahlenden radioaktiven Materials aus einem Bauwerk, Gebiet, Gegenstand oder einer Person. Die Entstrahlung kann erfolgen durch 1. entsprechende Behandlung der verstrahlten Fläche, so daß die Verstrahlung beseitigt oder verringert wird; 2. Stehenlassen des Materials, so daß die Radioaktivität durch natürlichen Zerfall verringert wird; 3. Abdecken des verstrahlten Materials, so daß die emittierte Strahlung geschwächt wird. Das nach dem ersten Verfahren beseitigte radioaktive Material muß in der Erde vergraben oder im Meer versenkt oder in anderer geeigneter Weise weggeschafft werden.

Explosion: Detonation. Siehe *Luftexplosion*, *Bodenexplosion*, *Untererdexplosion*, *Unterwasserexplosion.*

Explosionshöhe: Höhe über der Erdoberfläche, in welcher ein Sprengkörper in der Luft explodiert. Die optimale Explosionshöhe für ein bestimmtes Ziel (oder Gebiet) ist die Höhe, in der schätzungsweise ein Sprengkörper von bestimmtem Explosionswert eine bestimmte gewünschte Wirkung über einem größtmöglichen Gebiet erzeugt.

Explosionswert: gesamte wirksam werdende Energie, die bei einer Kern-(oder Atom-) Explosion ausgelöst wird. Für gewöhnlich in entsprechender Anzahl von Tonnen TNT ausgedrückt, die erforderlich wären, um bei Detonation die gleiche Energieauslösung zu verursachen. Der Gesamtexplosionswert tritt als Kernstrahlung, thermische Strah-

lung und Stoß-(und Luftdruck-)Energie auf, wobei deren genaue Verteilung (in erster Linie) von dem Medium abhängt, in dem die Explosion erfolgt, ferner von der Art des Sprengkörpers und der Zeit nach der Explosion.

Feuerball: leuchtende Kugel heißer Gase, die sich einige millionstel Sekunden nach einer Kern-(oder Atom-)Explosion bildet und sofort anfängt, sich auszubreiten und abzukühlen. Die Umrisse des Feuerballes zeichnen sich anfangs durch die leuchtende Stoßfront (in der Luft) und später durch die Umrisse der heißen Gase selbst scharf ab.

Feuersturm: örtlich begrenzter Großbrand, allgemein in bebauten städtischen Gebieten, der starke, von allen Seiten einströmende Winde erzeugt, welche eine Ausbreitung des Feuers verhindern, aber seine Heftigkeit durch Zufuhr frischen Sauerstoffs steigern.

Filmplakette: kleiner Rahmen aus Metall oder Kunststoff in Form einer Plakette. Wird von Hilfsmannschaften getragen und enthält einen Röntgen- (oder ähnlichen photographischen) Film zwecks Feststellung der Gesamtmenge ionisierender (oder Kern-) Strahlung, der ein Mensch ausgesetzt gewesen ist.

Gammastrahlen (oder -strahlungen): elektromagnetische Strahlungen von hoher Energie, die aus Atomkernen herrühren und viele Kernreaktionen begleiten, z. B. die Spaltung, die Radioaktivität und den Neutroneneinfang. Physikalisch sind Gammastrahlen identisch mit Röntgenstrahlen von hoher Energie; der einzige wesentliche Unterschied liegt darin, daß die Röntgenstrahlen nicht aus Atomkernen herrühren, sondern auf andere Weise entstehen, z. B. durch Verlangsamen von (schnellen) Neutronen hoher Energie.

Geschützartige Waffe: Vorrichtung, in der zwei oder mehrere Stücke spaltbaren Materials, von denen jedes weniger als die kritische Masse aufweist, sehr rasch zusammengebracht werden, so daß sie eine überkritische Masse bilden, die auf Grund einer sich rasch ausdehnenden Spaltungskette explodieren kann.

Gischt: Spur einer fortschreitenden Stoßwelle, die auf verhältnismäßig ruhiger Wasseroberfläche als Kreis von rasch zunehmender Größe sichtbar ist und weißer aussieht als das umgebende Wasser. Wird insbesondere nach einer Unterwasserexplosion beobachtet.

Halbwertsdicke: Dicke eines bestimmten Materials, die die Hälfte der einwirkenden Gammastrahlung absorbiert. Diese Dicke hängt von der Art des Materials ab – sie ist etwa umgekehrt proportional zu seiner Dichte – sowie von der Energie der Gammastrahlen.

Halbwertszeit: die für die Aktivität eines bestimmten Isotops erforderliche Zeit, um ihren Anfangswert auf Grund radioaktiven Zerfalls auf die Hälfte zu verringern. Die Halbwertszeit ist eine charakteristische Eigenschaft aller Isotope und ist von ihrer Menge und ihrem Zustand unabhängig. Die *biologische Halbwertszeit* ist die Zeit, die die Menge eines in den Körper (oder in ein bestimmtes Organ) gelangten Elements braucht, um durch natürliche biologische Ausscheidungsprozesse auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes verringert zu werden. Die *effektive Halbwertszeit* eines bestimmten Isotops ist die Zeit, in welcher die im Körper vorhandene Menge durch radioaktiven Zerfall und durch biologische Ausscheidungsprozesse auf die Hälfte verringert wird.

Höchstzulässige Bestrahlung: die gesamte Bestrahlungsmenge, die schätzungsweise ein gesunder Mensch täglich aufnehmen darf, ohne daß sich je in seinem Leben schädliche Auswirkungen zeigen.

Heiße Stelle: Bereich in einem verstrahlten Gebiet, in dem der Grad der Verstrahlung etwas höher liegt als in benachbarten Bezirken des Gebietes. Siehe *Verstrahlung*.

H-Waffe: Abkürzung für Wasserstoffwaffe. Siehe *Wasserstoffwaffe*.

Hypozentrum: Ausdruck, der manchmal für den Nullpunkt verwendet wird. Siehe *Nullpunkt*.

Implosionswaffe: Vorrichtung, in der das Volumen einer Menge spaltbaren Materials, die geringer ist als die kritische Masse, plötzlich durch Kompression verringert wird, so daß sie überkritisch wird und eine Explosion erfolgen kann. Die Kompression wird durch eine kugelförmige Anordnung besonders hergestellter Sprengstoff-Formen erreicht, die eine nach innen gerichtete Implosionswelle erzeugen, wobei das spaltbare Material in der Mitte der Kugel liegt. Siehe *Überkritisch.*

Impuls: Produkt des Überdruckes (oder dynamischen Druckes) aus der Luftstoßwelle einer Explosion und der Zeit, während welcher sie auf einen gegebenen Punkt einwirkt. Genauer gesagt, ist der Impuls das Integral des Überdruckes (oder dynamischen Druckes) in bezug auf die Zeit, wobei die Integration zwischen der Ankunftszeit der Luftstoßwelle und dem Zeitpunkt liegt, zu welchem der Überdruck (oder dynamische Druck) an dem betr. Punkt wieder gleich null ist.

Induzierte Radioaktivität: Radioaktivität, die in bestimmten Materialien durch Kernreaktionen erzeugt wird, insbesondere durch Neutroneneinfang, wobei sich instabile Kerne bilden. Die von Neutronen aus einer Kern-(oder Atom-)Explosion induzierte Aktivität in Stoffen, welche die Elemente Natrium, Mangan, Silizium oder Aluminium enthalten, kann bedeutend sein.

Innere Strahlung: Kernstrahlung (Alpha- und Betateilchen sowie Gammastrahlung) aus radioaktiven Substanzen im Körper. Von Bedeutung als innere Strahlungsquellen sind Jod-131 in der Schilddrüse sowie Strontium-90 und Plutonium-239 in den Knochen.

Intensität: Energie (einer beliebigen Strahlung), die je Zeiteinheit auf eine Flächeneinheit senkrecht zur Strahlenrichtung einwirkt (oder sie durchfließt). Die Intensität der thermischen Strahlung wird meist in cal/(cm^2 · sec) für eine gegebene Fläche in einem bestimmten Augenblick ausgedrückt. In bezug auf die Kernstrahlung wird der Ausdruck »Intensität« manchmal ziemlich frei gebraucht, um die Bestrahlungs-Dosisleistung an einem gegebenen Punkt auszudrücken, z. B. in Röntgen (oder Milliröntgen) je Stunde.

Ionisierende Strahlung: elektromagnetische Strahlung (Gammastrahlen oder Röntgenstrahlen) oder Teilchenstrahlung (Alphateilchen, Betateilchen, Neutronen usw.), die, wenn sie durch Materie hindurchgeht, direkt oder indirekt Ionen, d. h. elektrisch geladene Teilchen, erzeugen kann.

Isotope: Formen des gleichen Elements mit identischen chemischen Eigenschaften, aber unterschiedlich in der Atommasse (auf Grund verschiedener Neutronenzahl im Kern) und in den nuklearen Eigenschaften, z. B. Radioaktivität, Spaltung usw. Wasserstoff z. B. hat 3 Isotope mit 1 Masseneinheit (Wasserstoff), 2 Masseneinheiten (Deuterium) oder 3 Masseneinheiten (Tritium). Hiervon sind die ersten beiden stabil (nicht radioaktiv), aber das dritte (Tritium) ist ein radioaktives Isotop. Die beiden gewöhnlichen Uranisotope mit 235 bzw. 238 Masseneinheiten sind radioaktiv, da sie Alphateilchen emittieren, aber ihre Halbwertszeit ist verschieden. Ferner ist Uran-235 durch Neutronen jeder Energie spaltbar, Uran-238 aber wird nur von Neutronen hoher Energie gespalten.

Kern (oder Atomkern): der kleine, zentrale, positiv geladene Teil eines Atoms, der im wesentlichen die gesamte Masse trägt. Mit Ausnahme des gewöhnlichen (leichten) Wasserstoffkerns, der aus einem einzelnen Proton besteht, enthalten alle Atomkerne Protonen und Neutronen. Die Anzahl der Protonen bestimmt die gesamte positive Ladung oder *Atomzahl;* das gleiche gilt für alle Atomkerne eines bestimmten chemischen Elements. Die Gesamtzahl der Neutronen und Protonen, die die *Massenzahl* genannt wird, steht in enger Beziehung zur Masse (oder zum Gewicht) des Atoms. Die Kerne der Isotope eines bestimmten Elements enthalten die gleiche Protonenzahl, aber verschieden

viele Neutronen. Sie haben also die gleiche Atomzahl und gehören damit zum gleichen Element, aber ihre Massenzahl (und ihre Masse) ist verschieden. Die nuklearen Eigenschaften, z. B. Radioaktivität, Spaltung, Neutroneneinfang usw. von einem Isotop eines bestimmten Elements werden durch die Neutronen- und die Protonenzahl bestimmt. Siehe *Atom, Element, Isotop, Neutron, Proton.*

Kernstrahlung: Teilchen- und elektromagnetische Strahlung, die aus Atomkernen in verschiedenen Kernprozessen emittiert wird. Die Kernstrahlungen, die in bezug auf Waffenwirkungen von Bedeutung sind, sind Alpha- und Betateilchen, Gammastrahlen und Neutronen. Alle Kernstrahlungen sind ionisierende Strahlungen, das Gegenteil gilt jedoch nicht; Röntgenstrahlen z. B. gehören zu den ionisierenden Strahlungen, sind aber keine Kernstrahlungen, da sie nicht aus Atomkernen herrühren. Siehe *Ionisierende Strahlung.*

Kern-(oder Atom-)Versuche: Versuche, die auf dem Versuchsgelände von Nevada oder im Versuchsraum von Eniwetok durchgeführt wurden, um die für die Konstruktion und die Verbesserung von Kern-(oder Atom-)Waffen erforderlichen Erkenntnisse zu liefern und die mit Kern-(oder Atom-)Explosionen verbundenen Erscheinungen und Wirkungen zu untersuchen. Viele der in diesem Buch enthaltenen Angaben beruhen auf den bei solchen Versuchen angestellten Messungen und Beobachtungen. Die Decknamen und einige Angaben über alle bis 1956 von der Atomenergiekommission der Vereinigten Staaten durchgeführten Versuche sind in nachstehender Tabelle aufgeführt.

Zusammenstellung der Kernversuche

				Explosion				
Zeit	Deckname	Ort	Gesamtzahl	in der Luft	vom Turm	an der Erd- od. Wasseroberfläche	unter Erdgleiche	unter Wasser
1945	Trinity	Neu-Mexiko	1	–	1	–	–	–
1946	Crossroads	Pazifik	2	1	–	–	–	1
1948	Sandstone	Pazifik	3	–	3	–	–	–
1951	Ranger	Nevada	5	5	–	–	–	–
1951	Greenhouse	Pazifik	4	–	4	–	–	–
1951	Buster	Nevada	5	4	1	–	–	–
1951	Jangle	Nevada	2	–	–	1	1	–
1952	Tumbler	Nevada	4	4	–	–	–	–
1952	Snapper	Nevada	4	–	4	–	–	–
1952	Ivy	Pazifik	2	1	–	1	–	–
1953	Upshot	Nevada	9	2	7	–	–	–
1953	Knothole	Nevada	2	2	–	–	–	–
1954	Castle	Pazifik	–	–	–	–	–	–
1955	Teapot	Nevada	14	3	10	–	1	–
1955	Wigwam	auf See	1	–	–	–	–	1
1956	Redwing	Pazifik	–	–	–	–	–	–

Kernwaffe: allgemeine Bezeichnung für eine Waffe, bei der die Explosion aus der Energie entsteht, die durch Spaltungs- oder Verschmelzungsreaktion – oder beide zusammen – bei Atomkernen ausgelöst wird. Der A-(oder Atom-)Sprengkörper und die H-(oder Wasserstoff-)Waffe sind also Kernwaffen. Man könnte sie ebensogut »Atomwaffen« nennen, da es sich in beiden Fällen um die Energie von Atomkernen handelt. Es ist aber mehr oder weniger üblich geworden – wenn es auch nicht ganz exakt ist –, die Waffen als A- oder Atomsprengkörper zu bezeichnen, bei denen die gesamte Energie durch Spaltung entsteht. Zwecks besserer Unterscheidung werden die Waffen, in denen

zumindest ein Teil der Energie durch thermonukleare (Verschmelzungs-)Reaktion bei Wasserstoffisotopen entsteht, H-Waffen oder Wasserstoffwaffen genannt.

Kilotonne Energie: Energie einer Kern-(oder Atom-)Explosion, die der Energie entspricht, welche durch Detonation von 1 kt (d. h. 1000 t) TNT erzeugt wird, also 10^{12} Kalorien oder $4{,}2 \times 10^{19}$ erg. Siehe *Megatonne Energie, TNT-Äquivalent.*

Kondensationswolke: Dunst oder Nebel aus kleinsten Wassertröpfchen, der nach einer Kern-(oder Atom-)Explosion in verhältnismäßig feuchter Atmosphäre den Feuerball vorübergehend umgibt. In der negativen Phase der von der Explosion herrührenden Luftdruckwelle verursacht die Ausdehnung der Luft ein Absinken der Temperatur, so daß eine Kondensation des in der Luft vorhandenen Wasserdampfes eintritt und sich eine Wolke bildet. Die Wolke löst sich bald auf, wenn der Druck wieder normal wird und die Luft sich wieder erwärmt. Dieser Vorgang ist ähnlich wie der von Physikern in der Wilsonschen Nebelkammer angewandte und wird manchmal auch Nebelkammerwirkung genannt.

Kritische Masse: Mindestmasse eines spaltbaren Materials, die die Kettenreaktion der Spaltung unter genau festgelegten Bedingungen eben noch aufrecht erhält; zu diesen Bedingungen gehören z. B. die Art des Materials und seine Reinheit, die Art und Dicke des Neutronenreflektors, die Dichte (oder Verdichtung) und die äußere Form (oder Geometrie). Um eine Explosion zu verursachen, muß das System überkritisch sein, d. h. die Masse des Materials muß die kritische Masse unter den vorliegenden Bedingungen übersteigen. Siehe *Überkritisch.*

Kubikwurzelgesetz: Umrechnungsgesetz, das für viele Luftstoßmerkmale anwendbar ist. Es setzt die Zeit und die Entfernung, in denen eine bestimmte Luftstoßwirkung beobachtet wird, in Beziehung zur Kubikwurzel des Explosionswertes.

LD-50, LD/50 oder LD_{50}: Abkürzung für mittlere letale Dosis. Siehe *Mittlere tödliche Dosis.*

Linearer Absorptions-Koeffizient: siehe *Absorptions-Koeffizient.*

Loslösung: Einsetzen eines Zustandes, in dem bei Explosion einer Kern-(oder Atom-)Waffe die Stoßfront (in der Luft) sich vom Umkreis des sich ausdehnenden Feuerballes wegbewegt. Siehe *Feuerball, Stoßfront.*

Luftdruckwelle: von Winden begleiteter Druckimpuls der Luft, der sich gleichmäßig vom Explosionspunkt hinweg ausbreitet. Siehe *Stoßwelle.*

Luftexplosion: Explosion einer Kernwaffe in einer solchen Höhe, daß der sich ausbreitende Feuerball die Erdoberfläche nicht berührt, wenn die Helligkeit (im zweiten Impuls) am stärksten ist. Eine *typische Luftexplosion* ist eine Explosion, bei der die Explosionshöhe in einer mittleren Stadt maximale Luftdruckschäden verursacht.

Luftstoßlast: auf ein Objekt einwirkende Last (oder Kraft), die bei einer Explosion durch den Luftstoß verursacht wird, welcher auf das Objekt auftrifft und es umfließt. Die Luftstoßlast setzt sich zusammen aus der Last infolge des Überdrucks (oder des bei der Beugung auftretenden Drucks) und des dynamischen Drucks (oder Strömungswiderstands). Siehe *Beugung, Widerstandsbelastung, Dynamischer Druck, Überdruck.*

Luftstoßumrechnungsgesetze: Formeln zur Berechnung der Eigenschaften einer Luftstoßwelle, z. B. Überdruck, dynamischer Druck, Ankunftszeit, Dauer usw. in beliebiger Entfernung von einer Explosion von bestimmtem Explosionswert. Grundlage der Berechnung bildet die bekannte Veränderung dieser Eigenschaften in Abhängigkeit von der Entfernung bei einer Bezugsexplosion von bekanntem Explosionswert, z. B. 1 kt Siehe *Kubikwurzelgesetz.*

Machsche Front: siehe *Machscher Stamm.*

Machscher Bereich: Bereich an der Erdoberfläche, in dem sich der Machsche Stamm infolge einer Luftexplosion gebildet hat.

Machscher Stamm: die durch die Vereinigung der einfallenden und der reflektierten Stoßfront bei einer Explosion entstehende Stoßfront. Der Ausdruck wird allgemein in bezug auf eine Luftdruckwelle angewandt, die sich in der Luft fortgepflanzt hat und an der Erdoberfläche reflektiert wird. Der Machsche Stamm verläuft nahezu senkrecht zur reflektierenden Fläche und weist eine nach vorn leicht gewölbte Front auf. Der Machsche Stamm wird auch Machsche Front genannt. Siehe *Stoßfront*, *Stoßwelle.*

Massen-Absorptionskoeffizient: siehe *Absorptionskoeffizient.*

Massenzahl: siehe *Kern.*

Megatonne Energie: Energie einer Kern-(oder Atom-)Explosion, die 1 Million Tonnen (oder 1000 kt) TNT entspricht, d. h. 10^{15} Kalorien oder $4{,}2 \times 10^{22}$ erg. Siehe *TNT-Äquivalent.*

MeV (oder Million Elektronen-Volt): Energieeinheit, die meist in der Kernphysik angewandt wird. Sie entspricht $1{,}6 \times 10^{-6}$ erg. Bei jedem sich spaltenden Kern werden ungefähr 200 MeV Energie erzeugt.

Milliröntgen: der tausendste Teil eines Röntgen. Siehe *Röntgen.*

Mittlere tödliche Dosis: die Menge ionisierender (oder Kern-)Strahlung auf den ganzen Körper, die wahrscheinlich in einer großen Gruppe von Lebewesen oder lebenden Organismen zu 50% tödlich wirkt. Zur Zeit wird allgemein (wenn auch nicht überall) angenommen, daß eine Dosis von etwa 450 Röntgen, die im Laufe von höchstens einigen Stunden auf den ganzen Körper einwirkt, für den Menschen die mittlere tödliche Dosis darstellt.

Nachwinde: Windströmungen, die in der Nähe einer Kernexplosion in Richtung des Explosionszentrums auftreten und durch die Sogwirkung entstehen, die das Hochsteigen des Feuerballes begleitet.

Nebelkammerwirkung: siehe *Kondensationswolke.*

Negative Phase: siehe *Stoßwelle.*

Neutron: neutrales Teilchen, d. h. ein nicht elektrisch geladenes, von etwa Einheitsmasse; es ist in allen Atomkernen außer denen von gewöhnlichem (oder leichtem) Wasserstoff vorhanden. Neutronen sind nötig, um den Spaltungsprozeß einzuleiten, und bei Kern-(oder Atom-)Explosionen werden durch Spaltungs- und Verschmelzungsreaktionen große Mengen Neutronen erzeugt.

Nomineller Atomsprengkörper: jetzt veralteter Begriff, der früher angewandt wurde, um eine Atomwaffe mit einem Explosionswert zu bezeichnen, der 20 kt (d. s. 20000 t) TNT entspricht Das war ungefähr der Explosionswert der über Japan und bei den Bikini-Versuchen von 1946 zur Explosion gebrachten Atomsprengkörper.

Nukleare Strahlung: siehe *Kernstrahlung.*

Nukleare Waffe: siehe *Kernwaffe.*

Nullpunkt: Punkt an der Erd- oder Wasseroberfläche, der senkrecht unter oder über dem Explosionszentrum einer Kern-(oder Atom-)Waffe liegt.

Pazifischer Versuchsraum: siehe *Versuchsgelände von Eniwetok.*

Plastischer Bereich: Beanspruchungsbereich, in welchem ein Material nicht versagt, wenn es der Wirkung einer Kraft ausgesetzt wird, aber sich nicht völlig zurückbildet, so daß eine dauernde Verformung entsteht, wenn die Kraft beseitigt ist.

Plastische Verformungen: Größenveränderungen, die im plastischen Bereich entstehen. Siehe *Elastischer Bereich.*

Positive Phase: siehe *Stoßwelle.*

Proton: Teilchen von etwa einer Masseneinheit mit einer Einheit positiver Ladung; physikalisch identisch mit dem Kern des gewöhnlichen (leichten) Wasserstoffatoms. Alle Atomkerne enthalten Protonen. Siehe *Kern.*

RAD: Einheit absorbierter Strahlungsdosis; stellt die Absorption von 100 erg Kern-(oder ionisierender)Strahlung je Gramm absorbierenden Materials oder Gewebes dar.

Radioaktiver Niederschlag: Vorgang des Zurückfallens der mit radioaktivem Material aus der Atomwolke verstrahlten Teilchen. Der Ausdruck wird auch als Sammelbegriff für die verstrahlte Teilchenmaterie selbst angewandt.

Radioaktivität: spontane Strahlungsemission aus den Kernen eines (instabilen) Isotops, meist Alpha- oder Betateilchen, oft von Gammastrahlen begleitet. Durch diese Emission wird das radioaktive Isotop in das Isotop eines anderen Elementes umgewandelt (oder zerfällt in dieses andere Isotop), welches radioaktiv sein kann oder nicht radioaktiv. Schließlich bildet sich nach einem oder mehreren radioaktiven Zerfallsstadien ein stabiles (nicht radioaktives) Endprodukt.

Raumentfernung: Entfernung von einem gegebenen Punkt, für gewöhnlich an der Erdoberfläche, bis zu dem Punkt, an welchem die Explosion erfolgt.

RBE (oder relativer biologischer Effekt): Verhältnis der RAD-Zahl Gamma oder Röntgenstrahlung von bestimmter Energie, die eine bestimmte biologische Wirkung verursacht, zu der RAD-Zahl einer anderen Strahlung, die nötig ist, um die gleiche Wirkung zu erzeugen, ist der RBE dieser letzteren Strahlung.

Reflektierter Druck: Gesamtdruck, der in dem Augenblick entsteht, in dem eine Stoß-(oder Luftdruck-)Welle, die sich in einem Medium fortpflanzt, auf ein anderes Medium auftrifft, z. B. in dem Augenblick, in dem die Front einer Luftdruckwelle in der Luft auf die Oberfläche eines Objekts oder Bauwerks auftrifft.

Reflexionsfaktor: Verhältnis des gesamten (reflektierten) Druckes zum einfallenden Druck, wenn eine Stoß-(oder Luftdruck-)Welle, die sich in einem Medium fortpflanzt, auf ein anderes Medium auftrifft.

REM: Einheit biologischer Strahlungsdosis; die Bezeichnung ist hergeleitet aus den Anfangsbuchstaben des Begriffes »Röntgen-Equivalent Man (oder Mammal)«. Die Zahl der Strahlungs-REM ist gleich der Zahl absorbierter RAD, multipliziert mit dem RBE der betreffenden Strahlung (für eine bestimmte Wirkung). Siehe *RAD, RBE.*

REP: Einheit absorbierter Strahlungsdosis; die Bezeichnung ist hergeleitet aus den Anfangsbuchstaben des Begriffes »Röntgen-Equivalent Physical«. Grundsätzlich soll das REP die Menge absorbierter Energie je Gramm weichen Gewebes bei Bestrahlung mit 1 Röntgen Gamma-(oder Röntgen-)Strahlung ausdrücken; schätzungsweise etwa 97 erg, obwohl der tatsächliche Wert von gewissen Einzelheiten des Versuchs abhängt, die nicht genau bekannt sind. Das REP ist also allgemein zu definieren als Dosis einer beliebigen ionisierenden Strahlung, bei der 97 erg je Gramm weichen Gewebes absorbiert werden. REP und RAD sind bei weichem Gewebe im wesentlichen gleich. Siehe *RAD, Röntgen.*

Röntgen: Einheit der Gammabestrahlungsdosis (oder Röntgenbestrahlungsdosis). Genau definiert, ist ein Röntgen die Menge Gamma-(oder Röntgen-)Strahlung, die bewirkt, daß die dabei auftretende Korpuskularemission je 0,001293 g Luft Ionen in der Luft erzeugt, die eine elektrostatische Einheit positiver oder negativer Elektrizitätsmenge tragen. Nach dem angenommenen Wert für die Energie, die ein Elektron bei der Er-

zeugung eines positiv-negativen Ionenpaares in der Luft verliert, ergibt 1 Röntgen Gamma-(oder Röntgen-)Strahlung schätzungsweise die Absorption von 87 erg je Gramm Luft.

Rückstandsstrahlung: Kernstrahlung, hauptsächlich Betateilchen und Gammastrahlen, die nach einer Kern-(oder Atom-)Explosion einige Zeit anhält. Die Strahlung wird hauptsächlich von den Spaltungsprodukten und anderen Sprengkörperüberresten im radioaktiven Niederschlag und in gewissem Umfange von Erd- und Wasserbestandteilen und sonstigen Materialien emittiert, die durch Neutroneneinfang radioaktiv induziert wurden. Siehe *Radioaktiver Niederschlag, Anfangsstrahlung, Induzierte Radioaktivität.*

Säule: Hohlzylinder aus Wasser und Wasserstaub, der bei Unterwasserexplosion einer Kern-(oder Atom-)Waffe hochgeschleudert wird, wobei die heißen, unter hohem Druck stehenden Gase, die sich bei der Explosion gebildet haben, in die Atmosphäre getragen werden. Bei einer Untererdexplosion bildet sich eine etwa ähnliche Säule aus Erde.

Schadensmerkmale: Normen oder Maßeinheiten für die Berechnung bestimmter Schadensgrade.

Schwellendetektor: Element (oder Isotop), bei dem die Radioaktivität nur durch Einfang solcher Neutronen induziert wird, deren Energie über dem für das Element (oder Isotop) charakteristischen Schwellenwert liegt. Schwellendetektoren werden verwendet, um das Neutronenspektrum aus einer Kern-(oder Atom-)Explosion zu ermitteln, z. B. die Neutronenzahl in verschiedenen Energiebereichen.

Sichtweite (oder Sicht): horizontale Entfernung (in km), in der ein großer, dunkler Gegenstand bei Tageslicht gegen den Horizont gerade noch zu sehen ist. Die Sicht ist abhängig von der Klarheit der Luft und reicht von über 50 km bei außergewöhnlich klarer Luft bis zu weniger als 1,6 km bei dichtem Dunst oder Nebel.

Spaltung: Vorgang, in welchem der Kern eines bestimmten schweren Elements in (meist) zwei Kerne leichterer Elemente gespalten wird, wobei größere Mengen Energie freiwerden. Die bedeutendsten spaltbaren Materialien sind Uran-235 und Plutonium-239.

Spaltungsprodukte: Sammelbegriff für die Mischung aus mehreren Substanzen, die durch Kernspaltung entsteht. Es ist zu unterscheiden zwischen diesen Substanzen und den direkten Spaltungsprodukten oder Spaltungsfragmenten, die sich durch das eigentliche Spalten der Kerne schwerer Elemente bilden. Etwa 80 verschiedene Spaltungsfragmente entstehen aus rund 40 verschiedenen Spaltungsarten eines bestimmten Isotops, z. B. Uran-235 oder Plutonium-239. Die Spaltungsfragmente beginnen, da sie radioaktiv sind, sofort zu zerfallen, wobei sie weitere (Tochter-)Produkte bilden, so daß diese Mischung aus vielen Spaltungsprodukten etwa 200 verschiedene Isotope von mehr als 30 Elementen enthält.

Sprengkörperüberreste: Rückstände einer Kern-(oder Atom-)Waffe nach ihrer Explosion. Die Überreste bestehen aus den für den Sprengkörpermantel und andere Sprengkörperbestandteile verwendeten Materialien sowie aus unverbrauchten Spaltungsmaterialien (Uran- und Plutoniumisotopen) und Spaltungsprodukten.

Sprühdom: siehe *Dom.*

Starre Scheiben: Wand (oder Zwischenwand), die dazu bestimmt ist, eine Last in Richtung der Wandfläche im Gegensatz zu seitlichen Lasten, die senkrecht zur Wand einwirken, aufzunehmen.

Stoßfront (oder Druckfront): die ziemlich scharfe Abgrenzung zwischen der Druckstörung infolge einer Explosion (Luft-, Untererd- oder Unterwasserexplosion) und der umgebenden Atmosphäre bzw. Erdboden oder Wasser. Sie bildet die Front der Stoß-(oder Luftdruck-)Welle.

Stoßwelle: ein sich ununterbrochen fortpflanzender Druckimpuls (oder Druckwelle) in dem umgebenden Medium, das sowohl Luft als auch Wasser oder Erde sein kann; dieser Druckimpuls entsteht durch die Ausdehnung der bei der Explosion erzeugten heißen Gase. Eine Stoßwelle in der Luft wird im allgemeinen als Luftdruckwelle bezeichnet, da sie starken, vorübergehenden Winden ähnlich ist (und von diesen begleitet wird). Die Dauer der Stoß-(oder Luftdruck-)Welle besteht aus zwei Phasen; die erste ist die positive Phase (oder Druckphase), in welcher der Druck sehr scharf auf einen Wert ansteigt, der höher ist als der umgebende Druckwert, und dann rasch wieder auf den normalen Druck abfällt. Die Dauer der positiven Phase erhöht sich und der maximale Druck (Druckspitze) verringert sich mit zunehmender Entfernung von einer Explosion bestimmten Explosionswertes. In der zweiten Phase, der negativen (oder Sog-)Phase, fällt der Druck unter den umgebenden und kehrt dann wieder auf den umgebenden Druckwert zurück. Die Dauer der negativen Phase ist während der ganzen Entwicklung der Luftdruckwelle ungefähr gleichbleibend und kann das Mehrfache der Dauer der positiven Phase betragen. Die Abweichungen vom umgebenden Druck während der negativen Phase sind niemals groß und verringern sich mit zunehmender Entfernung von der Explosion. Siehe *Überdruck*.

Strahlennachweis: Verfahren oder Tätigkeit der örtlichen Feststellung (und Messung) radioaktiver Verstrahlung mittels Meßinstrumenten, die ionisierende Strahlungen nachweisen und als Dosisleistung messen können. Ein Mensch, der diese Tätigkeit durchführt, wird in USA »Monitor« genannt.

Strahlung: siehe *Kernstrahlung, Thermische Strahlung.*

Strahlungssyndrom: siehe *Syndrom.*

Streuung: Ablenkung der thermischen Strahlung oder der Kernstrahlung von ihrer ursprünglichen Richtung durch Wechselwirkungen (oder Kollisionen) mit Atomen, Molekülen oder großen Teilchen in der Luft oder einem anderen Medium zwischen der Strahlungsquelle, z. B. einer Kern-(oder Atom-)Explosion, und einem Punkt in einiger Entfernung. Durch die Streuung werden die Strahlungen (insbesondere Gammastrahlen und Neutronen) an einem solchen Punkt aus vielen Richtungen aufgenommen anstatt nur aus der Richtung der Strahlungsquelle.

Syndrom: Gesamtheit der Symptome, welche die als »Strahlungskrankheit« bekannten Erkrankungen durch übermäßige ionisierende Bestrahlung des ganzen Körpers (oder eines großen Teils desselben) kennzeichnen. Die ersten Symptome dieser Art sind Übelkeit, Erbrechen und Durchfall; später können noch Haarausfall (Epilation), Blutungen, Entzündungen im Munde und im Rachen sowie allgemeine Schwäche hinzukommen. In schweren Fällen, wenn die Bestrahlung verhältnismäßig stark war, kann innerhalb von 2 bis 4 Wochen der Tod eintreten. Es kann angenommen werden, daß Personen, die 6 Wochen nach Einwirkung einer einzigen Strahlungsdosis noch am Leben sind, sich wieder erholen.

Thermische Strahlung: elektromagnetische Strahlung, die (in zwei Impulsen) aus dem Feuerball auf Grund seiner sehr hohen Temperatur emittiert wird; besteht im wesentlichen aus ultravioletten, sichtbaren und infraroten Strahlungen. In den Anfangsstadien (im ersten Impuls), wenn die Temperatur des Feuerballes außerordentlich hoch ist, überwiegt die ultraviolette Strahlung; im zweiten Impuls sind die Temperaturen niedriger, und der größte Teil der thermischen Strahlung liegt im sichtbaren und infraroten Bereich des Spektrums.

Thermonuklear: Beiwort, das sich auf den Prozeß (oder die Prozesse) bezieht, in dem durch sehr hohe Temperaturen die Verschmelzung leichter Kerne, wie z. B. solche von Wasserstoffisotopen, Deuterium und Tritium, bewirkt wird, wobei Energie freigemacht

wird. Ein thermonuklearer Sprengkörper ist eine Waffe, bei der ein Teil der Explosionsenergie aus thermonuklearen Verschmelzungsreaktionen entsteht. Die erforderlichen hohen Temperaturen erhält man durch Spaltungsexplosion. Siehe *Verschmelzung.*

TNT-Äquivalent: Maß für die Energie, die bei der Explosion einer Kern-(oder Atom-)Waffe oder bei der Explosion einer bestimmten Menge spaltbaren Materials ausgelöst wird; wird in Mengenbegriffen von TNT ausgedrückt, die bei Detonation die gleiche Energiemenge auslösen würden. Das TNT-Äquivalent wird allgemein in Kilotonnen oder Megatonnen angegeben. Das TNT-Äquivalent basiert darauf, daß die Detonation von 1 t TNT 10^9 cal Energie auslöst. Siehe *Kilotonne, Megatonne, Explosionswert.*

Tragende Wand: Wand, die einen Teil der Masse eines Bauwerks, z. B. die Decken oder den Dachstuhl stützt oder trägt.

Tripelpunkt: Schnittpunkt der einfallenden, der reflektierten und der vereinigten (oder Machschen) Stoßfront bei einer Luftexplosion. Die Höhe des Tripelpunktes über der Erd- oder Wasseroberfläche, d. h. die Höhe des Machschen Stammes, steigt mit zunehmender Entfernung von einer bestimmten Explosion. Siehe *Machscher Stamm.*

Tritium: radioaktives Wasserstoffisotop mit 3 Masseneinheiten; wird in Kernreaktoren durch Einwirkung von Neutronen auf Lithiumkerne erzeugt.

Überdruck: der vorübergehende Druck – gewöhnlich in kg/cm² = atü ausgedrückt –, der den umgebenden Druck übersteigt, welcher in der Stoß-(oder Luftdruck-)Welle einer Explosion festgestellt wird. Die Veränderung des Überdruckes mit der Zeit hängt vom Explosionswert, von der Entfernung vom Explosionspunkt und dem Medium ab, in welchem der Sprengkörper explodiert. Die *Überdruckspitze* ist der Höchstwert des Überdruckes an einem bestimmten Punkt; er tritt im allgemeinen in dem Augenblick auf, wenn die Stoß-(oder Luftdruck-)Welle diesen Punkt erreicht. Siehe *Stoßwelle.*

Überdruck in freier Atmosphäre (oder Druck in freier Atmosphäre): der über den Druck in der umgebenden Luft hinausgehende, nicht reflektierte Druck, der in der Luft durch die Luftdruckwelle aus einer Explosion entsteht.

Überkritisch: Ausdruck, der angewandt wird, um den Zustand eines bestimmten Spaltungssystems zu bezeichnen, wenn die Menge spaltbaren Materials größer ist als die kritische Masse unter den vorliegenden Bedingungen. Ein stark überkritisches System ist wichtig für die Erzeugung von Energie bei sehr großer Geschwindigkeit, so daß eine Explosion eintreten kann. Siehe *Kritische Masse.*

Überwachungsgerät: transportables Gerät, z. B. Geigerzähler oder Ionisierungskammer, zum Nachweis der Kernstrahlung und zur Messung der Dosisleistung. Siehe *Strahlennachweis.*

Umrechnungsgesetz: mathematisches Verhältnis, womit die Wirkungen einer Kern-(oder Atom-)Explosion von bestimmtem Explosionswert in Abhängigkeit von der Entfernung von der Explosion (oder vom Nullpunkt) festgestellt werden können, vorausgesetzt, daß die entsprechende Wirkung als Funktion der Entfernung bei einer Bezugsexplosion, z. B. 1-kt-Explosionswert, bekannt ist. Siehe *Luftstoßumrechnungsgesetz, Kubikwurzelgesetz.*

Umweltstrahlung: Kern- (oder ionisierende) Strahlung aus dem Innern des Körpers und aus der Umgebung, der der Mensch stets ausgesetzt ist. Die Hauptquellen der natürlichen Umweltstrahlung sind Kalium-40 im Körper, Kalium-40 und Thorium, Uran und deren Zerfallsprodukte (einschließlich Radium), die in Gesteinen vorhanden sind, sowie kosmische Strahlen.

Untererdexplosion: Explosion einer Kern-(oder Atom-)Waffe, deren Zentrum unter der Erdoberfläche liegt.

Unterwasserexplosion: Explosion einer Kern-(oder Atom-)Waffe, deren Zentrum unter der Wasseroberfläche liegt.

Verschmelzung: Vorgang, in welchem die Kerne leichter Elemente, insbesondere die der Wasserstoffisotope, nämlich Deuterium und Tritium, sich vereinigen und den Kern eines schwereren Elementes bilden, wobei größere Energiemengen freiwerden. Siehe *Thermonuklear.*

Verstrahlung: Ablagerung radioaktiven Materials auf Bauwerken, Gelände, Gegenständen oder Personen nach einer Kern-(oder Atom-)Explosion. Dieses Material besteht im allgemeinen aus radioaktivem Niederschlag, in dem sich Spaltungsprodukte und andere Sprengkörperüberreste mit Erdteilchen usw. vermischt haben. Eine Verstrahlung kann auch aus der in bestimmten Stoffen durch die Wirkung der Sprengkörperneutronen induzierten Radioaktivität entstehen. Siehe *Sprengkörperüberreste, Entstrahlung, Radioaktiver Niederschlag, Induzierte Radioaktivität.*

Versuche: siehe *Kernversuche.*

Versuchsgelände von Eniwetok: Gebiet im Raum der Marshall-Inseln, zu dem auch die Eniwetok- und Bikini-Atolle gehören und das für Kern-(oder Atom-)Versuche benutzt worden ist. Wurde früher »pazifischer Versuchsraum« genannt.

Versuchsgelände von Nevada: ein für Kern-(oder Atom-)Versuche benutztes Gebiet auf dem Kontinent der Vereinigten Staaten. Es liegt nordwestlich von Las Vegas im Staate Nevada innerhalb des Sprengkörper- und Geschützbereiches von Las Vegas.

Wärmeenergie: die aus dem Feuerball als thermische Strahlung emittierte Energie. Die Gesamtmenge der je Flächeneinheit in einer bestimmten Entfernung von der Kern-(oder Atom-)Explosion aufgenommenen Wärmeenergie wird allgemein in Kalorien/cm^2 ausgedrückt. Siehe *Thermische Strahlung, Durchlässigkeit.*

Wärmeenergieausbeute (oder Wärmegehalt): der Teil des gesamten Explosionswertes der Kern-(oder Atom-)Explosion, der als Wärmeenergie ausgestrahlt wird. In der Regel beträgt die Wärmeenergie ein Drittel des Gesamtexplosionswertes. Sie kann in Kalorien, erg oder als TNT-Äquivalent ausgedrückt werden.

Wärmestrahlung: siehe *Thermische Strahlung.*

Waffe, Atom-(oder Kern-)Waffe: siehe Kernwaffe.

Walze (oder Walzen-Erscheinung): siehe *Bodenwalze.*

Wasserstoffwaffe: Ausdruck, der manchmal für Kernwaffen angewandt wird, bei welchen ein Teil der Explosionsenergie durch Kernverschmelzungs-(oder thermonukleare) Reaktionen gewonnen wird. Siehe *Verschmelzung, Kernwaffe, Thermonuklear.*

Widerstandsbelastung: die auf ein Objekt oder Bauwerk einwirkende Kraft auf Grund der vorübergehenden Winde, die den Durchgang der Luftdruckwelle begleiten. Der Winddruck ist das Produkt des dynamischen Druckes und eines Koeffizienten, der von der Form (oder Geometrie) des Bauwerks oder Objektes abhängig ist. Siehe *Dynamischer Druck.*

Wilsonsche Nebelkammer: siehe *Kondensationswolke.*

Wolkenmerkmale: siehe *Atomwolke, Feuerball, Bodenwalze, Wolkensäule, Radioaktiver Niederschlag.*

Wolkensäule: sichtbare Rauchsäule, die sich vom Explosionspunkt einer Kern-(oder Atom-)Waffe nach oben ausdehnt. Die Wolkensäule bei einer Luftexplosion kann sich bis in die Tropopause, d. i. die Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre, erstrecken. Siehe *Atomwolke.*

Zerfall (oder radioaktiver Zerfall): Abklingen der Radioaktivität eines radioaktiven Materials im Laufe der Zeit auf Grund spontaner Emittierung von Alpha- oder Betateilchen aus dem Atomkern; manchmal von Gammastrahlung begleitet. Siehe *Halbwertszeit, Radioaktivität.*

Zerfallskurve: Darstellung des Abklingens der Radioaktivität im Verhältnis zur Zeit mittels einer graphischen Zeichnung.

2W-Begriff: die Auffassung, daß die Explosion einer Kernwaffe vom Explosionswert *W* an der Erdoberfläche die gleichen Luftdruckerscheinungen verursacht wie eine Kernwaffe von zweifachem Explosionswert, d. h. 2 W, die im Freien, also entfernt von jeder reflektierenden Fläche, explodiert.

Alphabetisches Wörterverzeichnis

(Erklärungen der einzelnen Begriffe siehe »Begriffsbestimmungen«)